Ciência e Tecnologia

Para o Desenvolvimento Ambiental, Cultural e Socioeconômico



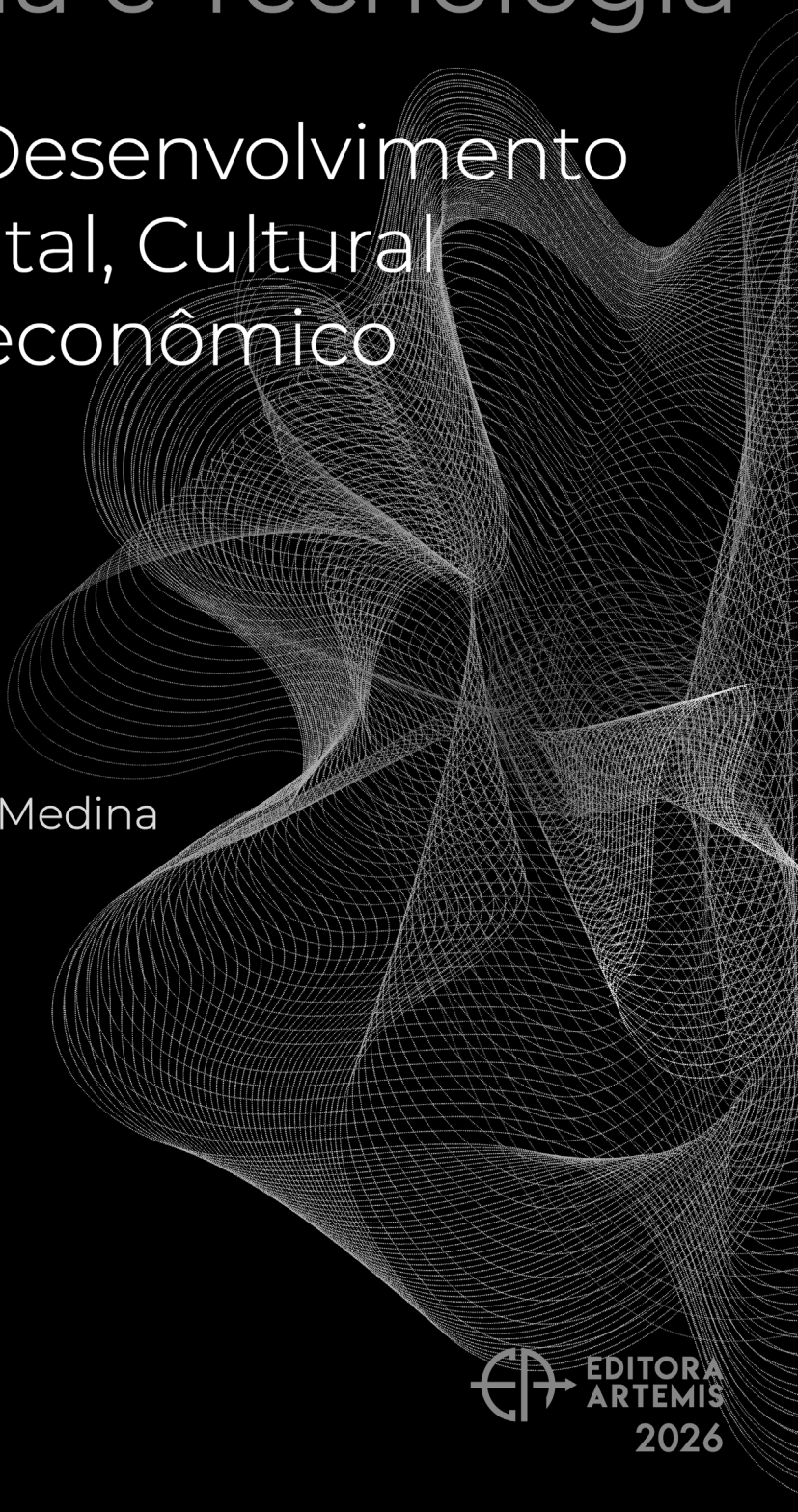
Xosé Somoza Medina
(organizador)

EDITORA ARTEMIS
2026

VOL IX

Ciência e Tecnologia

Para o Desenvolvimento Ambiental, Cultural e Socioeconômico



Xosé Somoza Medina
(organizador)

EDITORA ARTEMIS
2026

VOL IX

2026 *by Editora Artemis*
Copyright © Editora Artemis
Copyright do Texto © 2026 Os autores
Copyright da Edição © 2026 Editora Artemis

O conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons Atribuição-Não-Comercial NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0). Direitos para esta edição cedidos à Editora Artemis pelos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento, desde que sejam atribuídos créditos aos autores, e sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

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

Editora Chefe	Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Editora Executiva	M.ª Viviane Carvalho Mocellin
Direção de Arte	M.ª Bruna Bejarano
Diagramação	Elisangela Abreu
Organizador	Prof. Dr. Xosé Somoza Medina
Imagem da Capa	peacestock/123RF
Bibliotecário	Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

Conselho Editorial

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

EDITORA ARTEMIS 2026

Editora Artemis
Curitiba-PR Brasil
www.editoraartemis.com.br
e-mail:publicar@editoraartemis.com.br

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



Editora Artemis
Curitiba-PR Brasil
www.editoraartemis.com.br
e-mail:publicar@editoraartemis.com.br

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



Editora Artemis
Curitiba-PR Brasil
www.editoraartemis.com.br
e-mail:publicar@editoraartemis.com.br

Prof. Dr. Valter Machado da Fonseca, Universidade Federal de Viçosa, Brasil
Prof.ª Dr.ª Vanessa Bordin Viera, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
Prof.ª Dr.ª Vera Lúcia Vasilévski dos Santos Araújo, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil
Prof. Dr. Wilson Noé Garcés Aguilar, *Corporación Universitaria Autónoma del Cauca*, Colômbia
Prof. Dr. Xosé Somoza Medina, *Universidad de León*, Espanha

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

C569 Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento Ambiental, Cultural e Socioeconômico IX [livro eletrônico] / Organizador Xosé Somoza Medina. – 1. ed. – Curitiba, PR: Editora Artemis, 2026.
il. color.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Edição bilíngue.
Inclui bibliografia.
ISBN 978-65-82858-30-7
DOI 10.37572/EdArt_280926307

1. Ciência e tecnologia. 2. Meio ambiente. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Somoza Medina, Xosé.

CDD 600

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

EDITORA ARTEMIS
2026

Editora Artemis
Curitiba-PR Brasil
www.editoraartemis.com.br
e-mail:publicar@editoraartemis.com.br

PRÓLOGO

Un nuevo volumen de la serie ***Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento Ambiental, Cultural e Socioeconômico***, el noveno ya, nos permite volver a reflexionar sobre los avances científico-tecnológicos y la transferencia de conocimientos a la sociedad. La ciencia y la tecnología ocupan hoy un lugar central en la comprensión y transformación de los distintos ámbitos de la vida contemporánea, pero tan importante es el avance en sí como la creciente posibilidad de difusión de esas innovaciones. El desarrollo actual no se limita a la creación de nuevos dispositivos, procesos o sistemas, sino que se manifiesta también en la capacidad de analizar problemas complejos, optimizar recursos, generar soluciones sostenibles, fortalecer la formación científica y ampliar las formas de interacción entre conocimiento, sociedad y desarrollo. Este libro es un buen ejemplo de esto último.

El presente volumen, ***Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento Ambiental, Cultural e Socioeconômico IX***, reúne investigaciones que reflejan esta diversidad de aplicaciones a la sociedad de diferentes avances científicos y técnicos. Los capítulos aquí presentados abordan problemas y aplicaciones diversas, pero comparten una misma orientación: la búsqueda de respuestas actuales a situaciones problemáticas fundamentadas desde la ingeniería, la innovación tecnológica, la ciencia de materiales, la energía, el ambiente, la inteligencia artificial, la formación científico-tecnológica, o la comunicación de la ciencia.

La obra se organiza en tres grandes ejes temáticos.

El primero, "**Ingeniería, Metodologías y Procesos Tecnológicos**", reúne seis trabajos vinculados con modelado dinámico, robótica, diagnóstico técnico mediante vibraciones, procesos de corte y manufactura, mejora de la productividad industrial, estudio de materiales y biopolímeros y metodología de investigación en ingeniería. Estos capítulos evidencian el papel de la tecnología en la modelización, experimentación y optimización de procesos y la importancia de los avances metodológicos en el desarrollo de soluciones aplicadas a contextos industriales y científicos.

El segundo eje, "**Energía y Sostenibilidad**", integra cinco investigaciones relacionadas con la generación de energía mediante microturbinas hidráulicas, el aprovechamiento de la energía de las mareas, la exposición a contaminantes derivados del uso de biomasa como fuente de energía, la importancia de las plantas medicinales en la dieta y en la cultura tradicional y los nuevos enfoques de la comunicación pública sobre energía nuclear. En conjunto, estos estudios muestran cómo la energía, cualquier tipo de energía, es un ámbito del conocimiento científico y técnico de importancia clave en

nuestra sociedad actual. La energía importa, más que nunca, y la ciencia y la tecnología pueden contribuir tanto al aprovechamiento responsable de los recursos naturales como a la comprensión de sus impactos ambientales y sociales.

El tercer eje, "**Formación y Comunicación en la era de la Inteligencia Artificial**", amplía el campo de análisis hacia otro ámbito de total actualidad científica y tecnológica, la Inteligencia Artificial. Los seis trabajos reunidos en esta sección examinan el rendimiento académico a través de análisis estadísticos avanzados, el uso de podcasts como herramientas de desarrollo socioemocional docente, la aplicación de la inteligencia artificial en la gestión pública, las dificultades en el aprendizaje por la falta de pensamiento lógico-matemático en una muestra de estudiantes de ingeniería de sistemas computacionales, un modelo de análisis multivariante para evaluar el proceso de aprendizaje y el uso de mundos virtuales para mejorar las capacidades del profesorado. Este conjunto de contribuciones permite observar cómo las tecnologías digitales y la Inteligencia Artificial no solo modifican procedimientos técnicos, sino también las formas de enseñar, aprender y construir significado en el mundo académico.

La diversidad de enfoques presente en esta obra constituye uno de sus principales aportes. Lejos de entender la ciencia y la tecnología como campos aislados, los trabajos aquí reunidos muestran su carácter transversal y su capacidad para dialogar con cuestiones ambientales, educativas, sociales, productivas y culturales.

Esperamos que este volumen contribuya al intercambio de conocimientos, al fortalecimiento de nuevas investigaciones y a la difusión de experiencias y propuestas capaces de ampliar las posibilidades de desarrollo científico y tecnológico en diferentes contextos.

Xosé Somoza Medina
Universidad de León, Espanha

SUMÁRIO

ENGENHARIA, METODOLOGIAS E PROCESSOS TECNOLÓGICOS

CAPÍTULO 1.....1

ANÁLISIS DEL MODELO DINÁMICO DE UN MANIPULADOR ROBÓTICO INDUSTRIAL EN REFERENCIA AL DISEÑO DE SU SISTEMA DE CONTROL

Alejandro Armando Hossian
Roberto Carabajal
Carolina Hirschfeldt
Emanuel Maximiliano Alveal

https://doi.org/10.37572/EdArt_2809263071

CAPÍTULO 2.....16

APPLICATION OF VIBRATION EFFECTS IN TECHNICAL DIAGNOSTICS AND IDENTIFICATION

Vitalijs Beresnevics

https://doi.org/10.37572/EdArt_2809263072

CAPÍTULO 3.....32

CORTE POR CIZALLAMIENTO DE UNA SILUETA CIRCULAR BAJO CONDICIONES DE MÍNIMO Y MÁXIMO MATERIAL

Pedro de Jesús García Zugasti
Enrique Alejandro Vázquez Hernández
José de Jesús Navarro Delgado
Yolanda Rodríguez Corpus
Juan Compeán Rodríguez

https://doi.org/10.37572/EdArt_2809263073

CAPÍTULO 4.....46

IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍA ERIM PARA INCREMENTO DE PRODUCCIÓN EN ÁREA DE ACABADO DE ROTORES

Enrique Alejandro Vázquez Hernández
Pedro de Jesús García Zugasti
Juan Gabriel Sandoval Granja
Gerardo García Liñán
Luis Antonio Renovato Rivera

https://doi.org/10.37572/EdArt_2809263074

CAPÍTULO 5 58

ROLE OF THE INTERACTION AMYLOSE-NANOCELLULOSE ON THE RHEOLOGICAL PROPERTIES AND MOISTURE SORPTION OF MAIZE STARCH

Ignacia González
Makarena Jiménez
Paulo Díaz-Calderón

https://doi.org/10.37572/EdArt_2809263075

CAPÍTULO 6 72

CONSTRUCCIÓN DEL MARCO TEÓRICO EN PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA: REVISIÓN NARRATIVA Y ORIENTACIONES DIDÁCTICAS PARA ESTUDIANTES DE LICENCIATURA

Javier Montoya Ponce
Bertha Ivonne Sánchez Luján
María Teresa Martinez Acosta
María Guadalupe Amado Moreno

https://doi.org/10.37572/EdArt_2809263076

ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

CAPÍTULO 7 98

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE MICROTURBINAS HIDRÁULICAS

Nelson Ramiro Gutiérrez Suquillo
Luis Miguel Sánchez Muyulema
Jonnathan Ismael Chamba Cruz
Guillermo Raúl Tumalli Naranjo

https://doi.org/10.37572/EdArt_2809263077

CAPÍTULO 8 114

ENERGÍA DE LAS MAREAS, AGUA Y AIRE

Antonio Rabina Merelas

https://doi.org/10.37572/EdArt_2809263078

CAPÍTULO 9 128

EXPOSICIÓN A HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS POR EL USO DE LEÑA EN LA COMUNIDAD LA MARCELA, MIQUIHUANA, TAMAULIPAS

Lorenzo Heyer Rodríguez
Valeria Navarro López
Bárbara Azucena Hernández Macias
Elizabeth del Carmen Andrade Limas
Jacinto Treviño Carreón

https://doi.org/10.37572/EdArt_2809263079

CAPÍTULO 10 148

TALLER SOBRE FARMACIA Y COCINA VIVIENTE EN LA RESERVA DE LA BIÓSFERA SIERRA DE HUAUTLA

Amanda Ortiz Sánchez
Angélica María Alemán Octaviano

https://doi.org/10.37572/EdArt_28092630710

CAPÍTULO 11 159

BEYOND PUBLIC ACCEPTANCE: REFRAMING NUCLEAR ENERGY COMMUNICATION IN INDONESIA

Muhammad Yunus Zulkifli
Yunita Permatasari
Atika Ratna Sari

https://doi.org/10.37572/EdArt_28092630711

FORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA ERA DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

CAPÍTULO 12 171

ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO ACADÉMICO MEDIANTE TÉCNICAS ESTADÍSTICAS MULTIVARIANTES: UN ENFOQUE REPRODUCIBLE CON RMARKDOWN

Alberto Hananel Baigorria

https://doi.org/10.37572/EdArt_28092630712

CAPÍTULO 13 194

EL PODCAST EDUCATIVO COMO DISPOSITIVO DE AUDIO-MEDIACIÓN PARA EL DESARROLLO SOCIOEMOCIONAL DOCENTE: ARQUITECTURA, MODELO ECOS Y CONSIDERACIONES ÉTICAS PARA EL DISEÑO DE APPS DE PODCAST SEL

Paula Correa-Gutiérrez
Fabiola Sáez-Delgado
Pilar Jara-Coatt
Natalia Zañartu-Canihuante
Felipe Albarrán-Torres

https://doi.org/10.37572/EdArt_28092630713

CAPÍTULO 14 217

INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN LA GESTIÓN PÚBLICA: INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y CALIDAD DEL SERVICIO AL CIUDADANO

José Ángel Meneses Jiménez
Manuel Rocha Gonzales
Raul Hernando Aguado Apolaya

https://doi.org/10.37572/EdArt_28092630714

CAPÍTULO 15 230

DIFICULTADES EN LA RESOLUCIÓN DE EJERCICIOS Y HABILIDADES MATEMÁTICAS DE ESTUDIANTES EN LA MATERIA DE LENGUAJES Y AUTÓMATAS I

María Eugenia Carreón Romero
Emmanuel Vázquez Benito
Roberto Carlos Carreón Romero

https://doi.org/10.37572/EdArt_28092630715

CAPÍTULO 16 243

ANÁLISIS MULTIVARIANTE DEL RENDIMIENTO ACADÉMICO MEDIANTE R: UN ENFOQUE PRÁCTICO Y REPRODUCIBLE

Alberto Hananel Baigorria

https://doi.org/10.37572/EdArt_28092630716

CAPÍTULO 17 268

COMPUTACIÓN AFECTIVA Y DISEÑO TECNOPEDAGÓGICO DE SISTEMAS DE MUNDO VIRTUAL PARA EL ENTRENAMIENTO SOCIOEMOCIONAL DOCENTE: REQUERIMIENTOS, COMPONENTES, PARÁMETROS DE INMERSIÓN Y EL MODELO SEED DE DESARROLLO PSICOEMOCIONAL SIMULADO

Fabiola Sáez-Delgado
Pilar Jara-Coatt
Javier Mella-Norambuena
Paulo César Coronado-Sánchez
Paula Correa-Gutiérrez

https://doi.org/10.37572/EdArt_28092630717

SOBRE O ORGANIZADOR 295

ÍNDICE REMISSIVO 296

CAPÍTULO 1

ANÁLISIS DEL MODELO DINÁMICO DE UN MANIPULADOR ROBÓTICO INDUSTRIAL EN REFERENCIA AL DISEÑO DE SU SISTEMA DE CONTROL[1]

Data de submissão: 15/07/2026
Data de aceite: 31/07/2026

Alejandro Armando Hossian
Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional del Neuquén
Plaza Huincul, Provincia de Neuquén
República Argentina
https://orcid.org/0000-0002-0812-1806

Roberto Carabajal
Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional del Neuquén
Plaza Huincul, Provincia de Neuquén
República Argentina

Carolina Hirschfeldt
Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional del Neuquén
Plaza Huincul, Provincia de Neuquén
República Argentina

Emanuel Maximiliano Alveal
Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional del Neuquén
Plaza Huincul, Provincia de Neuquén
República Argentina

RESUMEN: El campo de conocimientos correspondientes a la "Dinámica" coloca su énfasis en el análisis del movimiento de los cuerpos teniendo en cuenta las causas que lo producen. En este sentido, el "Modelo Dinámico" de un robot manipulador estudia la relación entre el movimiento producido en el robot y los pares/fuerzas aplicadas por los accionadores en las articulaciones de este. Para obtener esta importante relación es fundamental la construcción del modelo dinámico, el cual permite vincular matemáticamente las siguientes cuestiones: I. La localización del robot definida por sus variables articulares o coordenadas de su extremo, y sus derivadas (velocidad y aceleración). II. Los pares y fuerzas aplicados en las articulaciones o extremo del robot. III. Los parámetros dimensionales del robot (longitudes, masas e inercia de sus elementos). En el presente artículo se trabaja sobre la obtención del modelo dinámico del robot manipulador, a los efectos de explicar ciertos fenómenos físicos presentes en su estructura mecánica, y que son sustanciales a la hora de acometer la importante tarea de diseño y evaluación de dicha estructura, a saber: "Efectos Inerciales" – "Fuerzas Centrípetas y de Coriolis" – "Par Gravitacional" y "Fricción". El modelo matemático que se obtiene, por lo general se expresa mediante una serie de ecuaciones diferenciales de 2do orden, cuya integración proporciona el tipo de movimiento que surge al aplicar fuerzas; o

[1] Presentado anteriormente en el 14° Congreso Internacional de Computación Aplicada a la Industria de Procesos CAIP 2019.

que fuerzas hay que aplicar para alcanzar un cierto movimiento. A modo de ejemplo, se implementa el algoritmo computacional de Lagrange en Matlab, haciendo uso del toolbox correspondiente propio de robótica.

PALABRAS CLAVE: Modelo Dinámico; Formulación Lagrangiana; Algoritmo Computacional.

ANALYSIS OF THE DYNAMIC MODEL OF AN INDUSTRIAL ROBOTIC MANIPULATOR WITH REGARD TO THE DESIGN OF ITS CONTROL SYSTEM

ABSTRACT: The field of knowledge corresponding to “Dynamics” places its emphasis on the analysis of the movement of bodies taking into account the causes that produce it. In this sense, the “Dynamic Model” of a manipulative robot studies the relationship between the movement produced in the robot and the pairs / forces applied by the actuators in its joints. In order to obtain this important relationship, the construction of the dynamic model is fundamental, which allows the following questions to be mathematically linked: I. The location of the robot defined by its articular variables or coordinates of its end, and its derivatives (speed and acceleration). II. The torques and forces applied to the joints or end of the robot. III. The dimensional parameters of the robot (lengths, masses and inertia of its elements. In this article we work on obtaining the dynamic model of the manipulator robot, in order to explain certain physical phenomena present in its mechanical structure, and which are substantial when undertaking the important task of design and evaluation of said structure, namely: “Inertial Effects” - “Centripetal and Coriolis Forces” - “Gravitational Pair” and “Friction”. The mathematical model that is obtained is usually expressed through a series of differential equations of the 2nd order, whose integration provides the type of movement that arises when applying forces; or what forces must be applied to reach a certain movement.

KEYWORDS: Dynamic Model; Lagrangian Formulation; Computational Algorithm.

1. INTRODUCCIÓN

El “Modelo Dinámico” estudia la relación entre el movimiento producido en el robot y los pares/fuerzas aplicadas por los accionadores en las articulaciones del robot.

1.1. MODELO DINÁMICO

El modelo dinámico vincula matemáticamente los siguientes elementos:

I. La localización del robot definida por sus variables articulares o coordenadas de su extremo, y sus derivadas (velocidad y aceleración).

II. Los pares y fuerzas aplicados en las articulaciones o extremo del robot.

III. Los parámetros dimensionales del robot (longitudes, masas e inercia de sus elementos. El modelo matemático que se obtiene se expresa mediante una serie de ecuaciones diferenciales de 2do orden, de cuya integración surgen dos opciones (Paul, 1981):

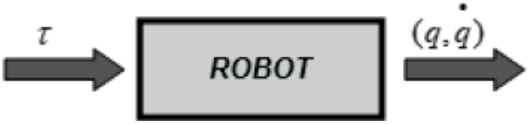
A. **Modelo Dinámico Directo:** la evolución en el tiempo de las variables articulares en función de las fuerzas y pares que intervienen: ($\boldsymbol{q(t)} = \boldsymbol{f(\tau(t))}$).

B. **Modelo Dinámico Inverso:** la evolución en el tiempo de fuerzas y pares aplicados para obtener una cierta evolución temporal de las variables articulares ($\boldsymbol{\tau(t)} = \boldsymbol{g(q(t))}$).

El modelo dinámico de un robot manipulador de n grados de libertad es: $\tau(t) = M(q)\ddot{q} + C(q\,\dot{q})\dot{q} + G(q) + Ff\ (\dot{q}, fe)$ (1)

Donde τ(t) es el vector de fuerzas o pares que se aplica a cada articulación, q ϵ R^n es el vector de posiciones articulares o coordenadas generalizadas, $\dot{q} \in R^n$ es el vector de velocidades articulares, $\ddot{q} \in R^n$ es el vector de aceleraciones articulares, $M(q) \in R^{nxn}$ es la matriz de inercia (representa el cambio de estado de movimiento del robot y es fundamental para el estudio de la estabilidad del sistema de control), $C(q, \dot{q}) \in Rnxn$ es la matriz de fuerzas centrípetas (fuerzas radiales en movimientos curvilíneos hacia adentro del centro de curvatura) y de Coriolis (esta fuerza representa la desviación del movimiento de traslación a raíz de su componente de rotación y, al igual que la matriz M(q), también es vital en el estudio de la estabilidad del sistema de control del robot), G(q) ϵ R^n es el vector de pares gravitacionales (vector gradiente de la energía potencial) y $\boldsymbol{F_f}(\dot{q}, \boldsymbol{f_e}) \in \boldsymbol{R^n}$ es el vector de pares de fricción (viscosa, Coulomb y estática) de cada articulación del manipulador. En síntesis, la expresión (1) es una ecuación diferencial compleja (Reyes Cortés, 2011), multivariable con dinámica fuertemente acoplada y "no lineal" en el vector de estados $\left[q^T, \dot{q}^T\right]^T$. El modelo representado por (1) se ilustra en (Figura 1) como un "sistema dinámico" con el vector t como entrada y los vectores como $(q, \dot{q})$ salidas del sistema.

Figura 1. Diagrama de bloques del Modelo Dinámico del Robot.



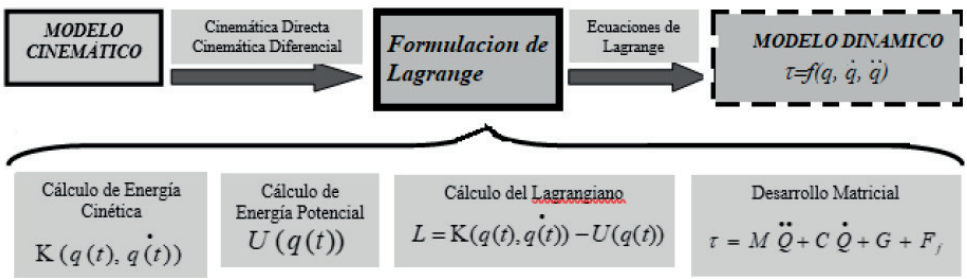
La complejidad del modelo dinámico está dada, fundamentalmente, por las matrices M(q), $C(q, \dot{q})$, $\boldsymbol{G(q)}$ y $\boldsymbol{F_f}(\dot{q}, \boldsymbol{f_e})$; cuyos elementos son funciones relativamente complejas de las posiciones y velocidades de cada articulación, y también de la geometría del robot (Spong, 2006).

1.2. ECUACIONES DE EULER – LAGRANGE

La formulación de Lagrange describe la dinámica de un robot a partir de un balance de energía, la cual se expresa en términos de energía cinética y potencial. En (Figura 2) se

observa el proceso metodológico empleado para la obtención del modelo dinámico; de la primera fase de la investigación se obtiene la cinemática directa y diferencial (posiciones y velocidades articulares), luego se aborda la formulación lagrangiana con los cálculos la energía cinética, potencial, el lagrangiano y el desarrollo matricial que permite obtener el vector de fuerzas o pares (τ) que se aplica a cada articulación en función de las coordenadas articulares, velocidades y aceleraciones (q, $\dot{q}$ y $\ddot{q}$) (Gates, 2007).

Figura 2. Proceso metodológico propuesto para la obtención del Modelo Dinámico.



Las ecuaciones escalares dinámicas de movimiento de Lagrange (2) para un robot manipulador de n grados de libertad (gdl) se formulan para cada (gdl), donde la expresión $\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{F}_f(\dot{q},\boldsymbol{f}_e)$ hace referencia a las fuerzas o pares no conservativos en cada articulación.

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial \dot{q}_i}\right] - \frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial q_i} = \tau - F_f(\dot{q}, f_e)\ i = 1,2,\dots,n$$

2. CONDICIONES EXPERIMENTALES

En (Figura 3) se ilustra un robot planar experimental de dos (gdl) con dos articulaciones rotacionales, dos eslabones de longitudes (l_1 y l_2) y masas (m_1 y m_2), las distancias entre los centros de masas (CM) y los ejes de giro (l_{c1} y l_{c2}), las posiciones articulares $q_1(t)$ y $q_2(t)$ y los momentos de inercia de cada eslabón con respecto al eje que pasa por su centro de masa (J_1 e J_2). Se procede a obtener el "Modelo Dinámico" (Barrientos, 2007):

I. Cálculo de la Energía Cinética: la energía cinética total del robot es la suma de la energía almacenada en cada eslabón ($K_{Total} = K_1 + K_2$); para cada uno, la contribución a la energía cinética total está dada por la porción de energía que aporta la velocidad de traslación del centro de masa, más la aportada por la velocidad de rotación en torno al CM. De la cinemática diferencial se obtiene las coordenadas y velocidades del CM de cada eslabón:

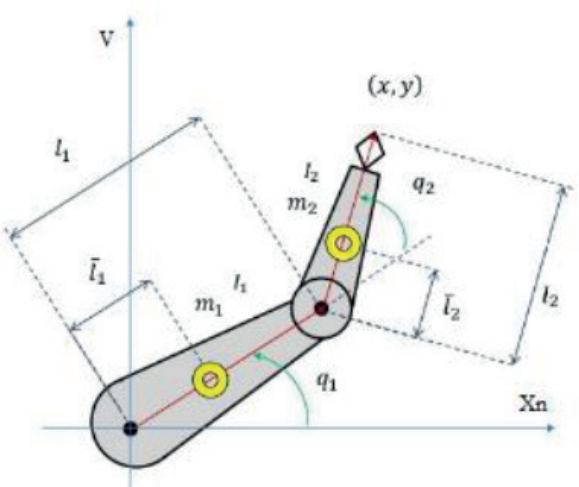
Para el eslabón 1: $x_1 = l_{c1}C_1$, $y_1 = l_{c1}S_1$; luego:

$v_1 = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{c1}C_1\dot{q}_1 \\ l_{c1}S_1\dot{q}_1 \end{bmatrix}$, el cuadrado de la velocidad del CM_1 es $v_1^T v_1 = [l_{c1}C_1\dot{q}_1 \quad l_{c1}S_1\dot{q}_1] x \begin{bmatrix} l_{c1}C_1\dot{q}_1 \\ l_{c1}S_1\dot{q}_1 \end{bmatrix} = l_{c1}^2\dot{q}_1^2$.

La energía cinética total del eslabón 1 es:

$$K_1(q,\dot{q}) = K_{1T} + K_{1R} = \frac{1}{2}m_1 v_1^T v_1 + \frac{1}{2}J_1\dot{q}_1^2 = \frac{1}{2}m_1 l_{c1}^2\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}J_1\dot{q}_1^2 \quad (3).$$

Figura 3. Robot planar de dos grados de libertad.



Para el eslabón 2 se tiene: $x_2 = l_1C_1 + l_{c2}C_{12}$, $y_2 = l_1S_1 + l_{c2}S_{12}$; Derivando respecto al tiempo, efectuando $v_2^T v_2$ y considerando que el efecto de la energía cinética rotacional está dado por la suma de las velocidades ($\dot{q}_1 + \dot{q}_2$), es:

$K_2(q,\dot{q}) = K_{2T} + K_{2R} = \frac{1}{2}m_2 v_2^T v_2 + \frac{1}{2}J_2(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2$, desarrollando:

$$K_2(q,\dot{q}) = \frac{m_2}{2}l_1^2\dot{q}_1^2 + \frac{m_2}{2}l_{c2}^2(\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) + m_2 l_1 l_{c2}(\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1\dot{q}_2)C_2 + \frac{1}{2}J_2(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \quad (4).$$

La energía cinética total del robot reemplazando (3) y (4) en $K_{Total}=K_1+K_2$ obteniéndose:

$$K_{TOTAL}(q,\dot{q}) = \frac{1}{2}m_1 l_{c1}^2\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}J_1\dot{q}_1^2 + \frac{m_2}{2}l_1^2\dot{q}_1^2 + \frac{m_2}{2}l_{c2}^2(\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) +$$

$$m_2 l_1 l_{c2}(\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1\dot{q}_2)C_2 + \frac{1}{2}J_2(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \quad (5)$$

II. Cálculo de la Energía Potencial: la energía potencial total del robot es la suma de la energía almacenada en cada eslabón ($U_{Total}=U_1+U_2=m_1gl_{c1}S_1+m_2g(l_1S_1+l_{c2}S_{12})$ (6).

III. Cálculo del Lagrangiano: $L = K_{TOTAL}(q(t), \dot{q}(t)) - U_{TOTAL}(q(t))$ (7); se sustituye (5) - (6) en (7):

$$L(q,\dot{q}) = \frac{1}{2}m_1 l_{c1}^2\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}J_1\dot{q}_1^2 + \frac{m_2}{2}l_1^2\dot{q}_1^2 + \frac{m_2}{2}l_{c2}^2(\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) + m_2 l_1 l_{c2}(\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1\dot{q}_2)C_2$$
$$+\frac{1}{2}J_2(\dot{q}_1+\dot{q}_2)^2 - m_1 g l_{c1}S_1 - m_2 g(l_1S_1 + l_{c2}S_{12}) \quad (7)$$

Se aplica la ecuación (2) para cada (gdl) del robot (o cada coordenada generalizada q_1 y q_2).

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial \dot{q}_1}\right] = [m_1 l_{c1}^2 + J_1 + J_2 + m_2(l_1^2 + l_{C2}^2 + 2l_1 l_{c2}C_2)]\ddot{q}_1 - [m_2 l_{c2}(l_1C_2 + l_{c2}) + J_2]\ddot{q}_2$$
$$-[2m_2 l_1 l_{c2}S_2]\dot{q}_1\dot{q}_2 - [m_2 l_1 l_{c2}S_2]\dot{q}_2^2 \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial \dot{q}_2}\right] = [m_1 l_{c2}^2 + J_2]\ddot{q}_2 + [m_2 l_{c2}(l_1C_2 + l_{c2}) + J_2]\ddot{q}_1 - [m_2 l_1 l_{c2}S_2]\dot{q}_1 \quad (9)$$

$$\frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial \dot{q}_1} = -g[(m_1 l_{c1} + m_2 l_1)C_1 + m_2 l_{c2}C_{12}] \quad (10)$$

$$\frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial \dot{q}_2} = -[m_2 l_1 l_{c2}S_2]\dot{q}_1^2 - [m_2 l_1 l_{c2}S_2]\dot{q}_1\dot{q}_2 - g m_2 l_{c2}C_{12} \quad (11)$$

IV. Desarrollo Matricial: se aplica la ecuación (2) para las coordenadas articulares 1 y 2, obteniéndose el par 1 y 2. Para obtener los pares 1 y 2 se opera de esta manera con las ecuaciones (8), (9), (10) y (11): τ_1 = (8) − (10) & τ_2 = (9) − (11) (pares que actúan en las articulaciones 1 y 2); que escritas en forma matricial es esta ecuación (12) (Craig):

$$\begin{bmatrix}\tau_1\\ \tau_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 l_{c1}^2 + J_1 + J_2 + m_2(l_1^2 + l_{C2}^2 + 2l_1 l_{c2}C_2) & m_2 l_{c2}(l_1C_2 + l_{c2}) + J_2 \\ m_2 l_{c2}(l_1C_2 + l_{c2}) + J_2 & (m_2 l_{C2}^2 + J_2)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{q}_1\\ \ddot{q}_2\end{bmatrix} +$$
$$\begin{bmatrix} -2m_2 l_1 l_{c2}S_2\dot{q}_2 & -m_2 l_1 l_{c2}S_2\dot{q}_2 \\ m_2 l_1 l_{c2}S_2\dot{q}_1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}g[(m_1 l_{c1} + m_2 l_{c2}C_{12})]\\ g m_2 l_{c2}C_{12}\end{bmatrix}$$

2.1. SIMULACIÓN EN MATLAB

La Toolbox de Robótica para Matlab, incluye la función rne que permite la resolución del modelo dinámico inverso de un robot mediante un algoritmo computacional (Ollero, 2007).

Para su uso es preciso haber definido previamente el robot, incluyendo parámetros dinámicos.

En el caso del robot, la definición responde al siguiente conjunto de instrucciones:

```
%(c) FUNDAMENTOS DE ROBOTICA (A. Barrientos) McGrawHill 2007
l1=10; l2=10;
d1=6; d2=6;
m1=20; m2=10;
clear L
%Parámetros de Denavit Hartenberg
L{1} = link([0 l1 0 0], 'standard'); L{2} = link([0 l2 0 0], 'standard');
%Masas de los eslabones
L{1}.m = m1; L{2}.m = m2;
%Coordenadas de los centros de masas de cada eslabón
L{1}.r = [ -(l1-d1) 0 0 ]; L{2}.r = [ -(l2-d2) 0 0 ];
% Tensores de Inercia (Ixx,Iyy,Izz,Ixy,Iyz,Ixz)
L{1}.I = [ 0 0 0 0 0 0]; L{2}.I = [ 0 0 0 0 0 0];
% Inercia del motor que acciona al elemento
L{1}.Jm = 0; L{2}.Jm = 0;
% Coeficiente de reducción del actuador del elemento
L{1}.G = 1; L{2}.G = 1;
% Rozamiento viscoso del actuador del elemento
L{1}.B = 0; L{2}.B = 0;
% Rozamiento de Coulomb en la dirección positiva y negativa del actuador del
elemento
L{1}.Tc = [ 0 0]; L{2}.Tc = [ 0 0];
% Definición del robot.
Scara = robot(L, 'Scara', 'UPM', 'Robot Scara 2 GDL'); Scara.name = 'Scara'; Scara.
manuf = 'UPM';
```

La function rne, proporciona los pares necesarios para una determinada trayectoria, definida mediante los vectores que contienen las coordenadas articulares, sus velocidades y aceleraciones. Por lo tanto, será preciso definir previamente estos.

Complementarias a la función rne la Toolbox de Robotica para Matlab cuenta con las funciones itorque, Coriolis y gravedad, que obtienen las aportaciones al par total por inercia, coriolis y gravedad respectivamente.

En las gráficas siguientes se recoge el resultado de este codigo para la trayectoria,

```
q1='sin(t)+pi/2'; q2='sin(5*t)+t+1';
% Número de puntos de la trayectoria
n=100;
% Definición de la trayectoria
%-----------------------------------
% Definición simbólica de la posición
sq1='sin(t)*t+pi/2'; sq2='sin(5*t)+t+1';
% Definicion de Fuerzas en el extremo
%-----------------------------------
sf3='[0 0 0 0]'; % Sustituir en cada eje en caso se querer aplicar
sn3='[0 0 0]'; % fuerzas o pares externos
% Obtención simbólica de la velocidad y aceleración
sqd1=diff(sq1,sym('t')) ;sqdd1=diff(sqd1,sym('t'));
sqd2=diff(sq2,sym('t')) ;sqdd2=diff(sqd2,sym('t'));
% Parámetros dimensionales
%-----------------------------------
l1=10; l2=10; d1=6; d2=6; m1=20; m2=10; g=9.8;
% Parámetros iniciales
%-----------------------------------
% Velocidades y aceleraciones de la base del robot
w0=[0 0 0]'; dw0=[0 0 0]'; v0=[0 0 0]'; dv0=-[0 -g 0]'; z0=[0 0 1]';
% Matriz de rotación entre {S2} y TCP ({S3})
%-----------------------------------------------
R23=eye(3);
% Bucle de paso de tiempo
%-------------------------------------------------------
for tk=1:1:n; t=(tk-1)/10;
% Evaluación numérica de posición, velocidad, aceleración y trayectoria del TCP
%-------------------------------------------------------
q1=eval(sq1) ;qd1=eval(sqd1) ;qdd1=eval(sqdd1);
q2=eval(sq2) ;qd2=eval(sqd2) ;qdd2=eval(sqdd2);
```

```
q(tk,1)=q1;qd(tk,1)=qd1;qdd(tk,1)=qdd1; q(tk,2)=q2;qd(tk,2)=qd2;qdd(tk,2)=qdd2;
XY(tk,1)=l1*cos(q1)+l2*cos(q1+q2); XY(tk,2)=l1*sin(q1)+l2*sin(q1+q2);
%Evaluación numérica de las fuerzas y pares en el TCP
%-----------------------------------------------
n3=eval(sn3)' ; f3=eval(sf3)' ; n_3(tk,:)=n3'; f_3(tk,:)=f3';
% PASO 1-2 Evaluacion de los vectores p,s y de la matriz de inercias
%-------------------------------------------------------------------
p1=[l1 0 0]'; %vector de {S0} a {S1}en el sistema {S1}
p2=[l2 0 0]'; %vector de {S1} a {S2}en el sistema {S2}
s1=[-(l1-d1) 0 0]'; %Coordenadas del cdg de la barra 1 respecto {S1}
s2=[-(l2-d2) 0 0]'; %Coordenadas del cdg de la barra 2 respecto {S2}
I1=zeros(3); %Inercias de barra 1 respecto su cdg en la base{S1};
I2=zeros(3); %Inercias de barra 2 respecto su cdg en la base{S2};
% PASO 3 Obtención de las matrices de rotación R01 y R12
%-----------------------------------------------------
R01=[cos(q1) -sin(q1) 0;sin(q1) cos(q1) 0;0 0 1];
R12=[cos(q2) -sin(q2) 0;sin(q2) cos(q2) 0;0 0 1];
%PASO 4 Evaluación de las velocidades angulares de {Si}
%-----------------------------------------------------
w1=R01'*(w0+z0*qd1); w2=R12'*(w1+z0*qd2);
% PASO 5 Evaluación de las aceleraciones angulares de {Si}
%-------------------------------------------------------
dw1=R01'*(dw0 +z0*qdd1)+cross(w0,z0*qd1);
dw2=R12'*(dw1 +z0*qdd2)+cross(w1,z0*qd2);
% PASO 6 Evaluación de las aceleraciones lineales de {Si}
%-------------------------------------------------------
dv1=cross(dw1,p1)+cross(w1,cross(w1,p1))+R01'*dv0; dv2=cross(dw2,p2)+cross(w
2,cross(w2,p2))+R12'*dv1;
% PASO 7 Evaluación de la aceleración lineal de los cdg
%-----------------------------------------------------
a1=cross(dw1,s1)+cross(w1,cross(w1,s1))+dv1;  a2=cross(dw2,s2)+cross(w2,cross(
w2,s2))+dv2;
% PASO 8 Evaluación de las fuerzas sobre los eslabones
%-----------------------------------------------------
f2=R23*f3+m2*a2; f1=R12*f2+m1*a1;
```

```
% PASO 9 Evaluación de los pares sobre los eslabones
%-----------------------------------------------------
n2=R23*(n3+cross((R23'*p2),f3))+cross((p2+s2),m2*a2)+I2*dw2+cross(w2,(I2
*w2));
n1=R12*(n2+cross((R12'*p1),f2))+cross((p1+s1),m1*a1)+I1*dw1+cross(w1,(I1*w1));
% PASO 10 Evaluación de los pares
%----------------------------------
P1=n1'*R01'*z0; P2=n2'*R12'*z0; PARES(tk,1)=P1; PARES(tk,2)=P2;
% FIN DEL ALGORITMO
%-----------------------------------------------------
%-.-.-.-.--.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-
% VERIFICACIÓN:
% Este código es únicamente a efectos de verificar que la programación del
algoritmo es correcta. Obtiene % la
solución analítica obtenida manualmente
T1=(m1*d1^2+m2*(l1^2+d2^2+2*l1*d2*cos(q2)))*qdd1+(m2*d2*(l1*cos(q2)+d2))*q
dd2-(2*m2*l1*d2*sin(q2))*qd2*qd1-(m2*d2*l1*sin(q2))*qd2*qd2
+g*((m1*d1+m2*l1)*cos(q1)+ m2*d2*cos(q1+q2));
T2=(m2*d2*(l1*cos(q2)+d2))*qdd1+(m2*d2^2)*qdd2+  (m2*d2*l1*sin(q2))*qd1*qd1+
g*m2*d2*cos(q1+q2);
PARES1(tk,1)=T1; PARES2(tk,2)=T2;
%-.-.-.-.--.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-
end % fin del bucle de paso de tiempo
%-----------------------------------------------------------------------
%-.-.-.-.--.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-
% VERIFICACIÓN:
% Este código es únicamente a efectos de verificar que la programación del
algoritmo es correcta
% Obtiene la solución mediante la función rne de la toolbox de robótica de Matlab
DefScara; % Se define el robot
grav=[0,9.8,0]; % Se define la gravedad con respecto al sistema {S0}
PARES3=rne(Scara,q,qd,qdd,grav,[f_3,n_3]);
%-.-.-.-.--.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-.-
% Presentación Gráfica de los resultados
figure(2)
```

```
Tau=rne(Rej5_6,q,qd,qdd,grav);
TauG = gravload(Rej5_6,q,grav);
TauC = coriolis(Rej5_6,q,qd);
TauI = itorque(Rej5_6,q,qdd);
subplot(2,4,1), hold
plot(Tau(:,1)),plot(T1,'rx'),title('Par Total Q1 L'),grid
legend(strcat('Q1:',sq1),'Location','SouthOutside')
legend boxoff,hold
subplot(2,4,2), plot(TauI(:,1)),title('Par Inercia Q1 L'),grid
subplot(2,4,3), plot(TauC(:,1)),title('Par Coriolis Q1 L'),grid
subplot(2,4,4), plot(TauG(:,1)),title('Par Gravedad Q1 L'),grid
subplot(2,4,5), hold
plot(Tau(:,2)),plot(F2,'rx'),title('Par Total Q2 L'),grid
legend(strcat('Q2:',sq2),'Location','SouthOutside')
legend boxoff,hold
subplot(2,4,6), plot(TauI(:,2)),title('Par Inercia Q2 L'),grid
subplot(2,4,7), plot(TauC(:,2)),title('Par Coriolis Q2 L'),grid
subplot(2,4,8), plot(TauG(:,2)),title('Par Gravedad Q2 L'),grid
```

Figura 4. Definición simbólica de la posición Q1.

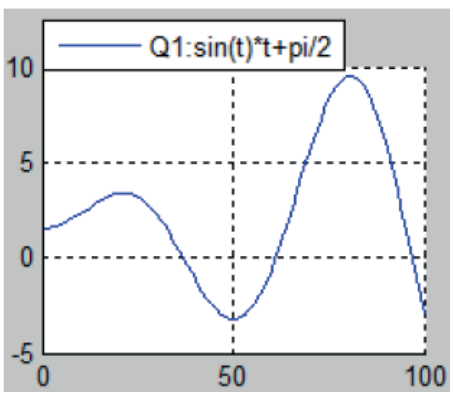


Figura 5. Definición simbólica de la posición Q2.

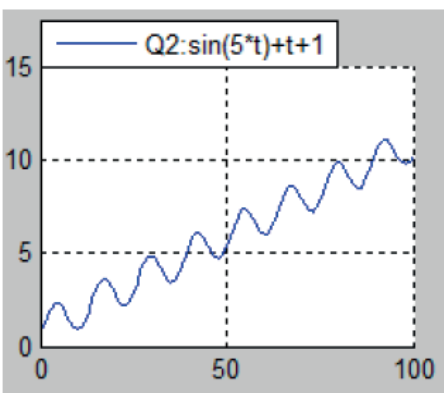


Figura 6. Par Q1 obtenido del algoritmo de Lagrange.

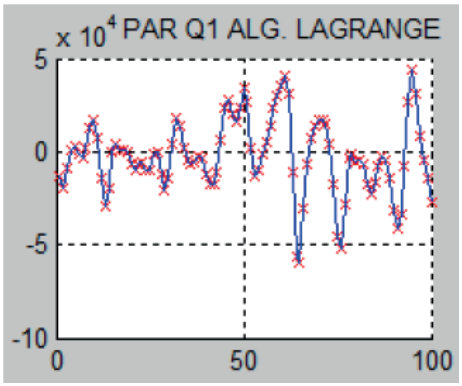


Figura 7. Par Q1 obtenido del algoritmo de Lagrange.

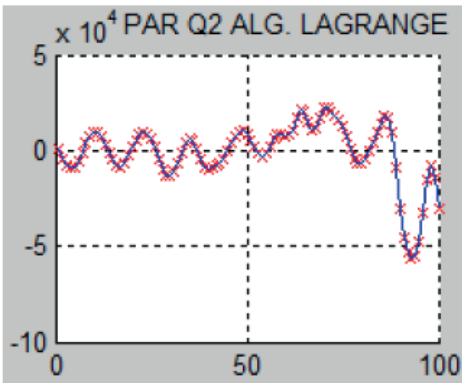


Figura 8. Par Total Q1 obtenido por Lagrange.

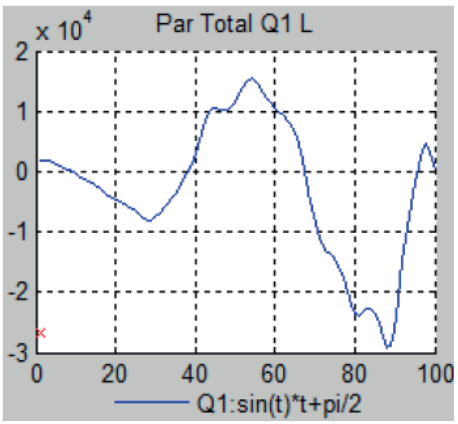


Figura 9. Par Total Q2 obtenido por Lagrage.

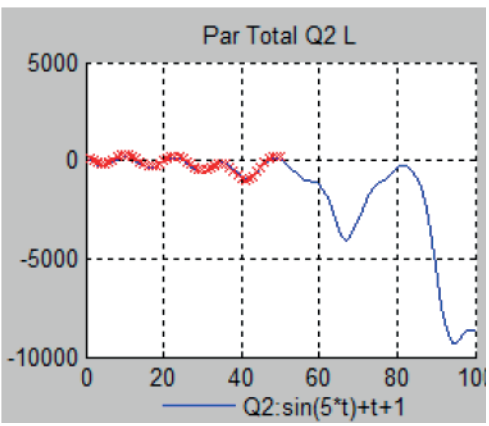


Figura 10. Par Inercia Q1 obtenido por Lagrange.

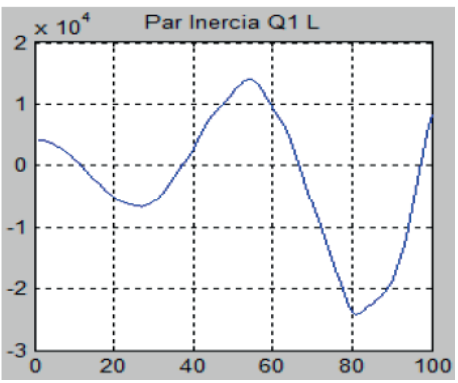


Figura 11. Par Inercia Q2 obtenido por Lagrange.

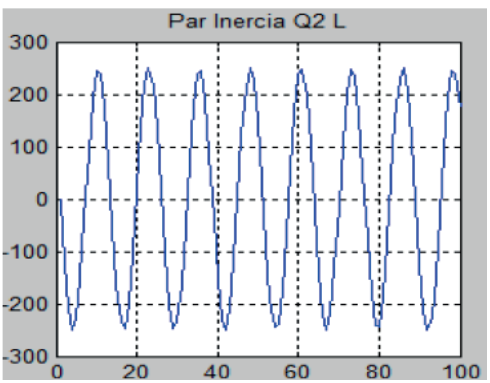


Figura 12. Par Coriolis Q1 obtenido por Lagrange.

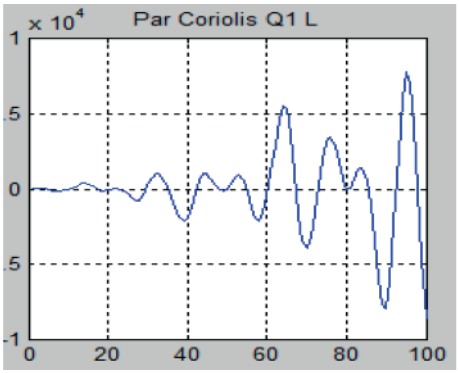


Figura 13. Par Coriolis Q2 obtenido por Lagrange.

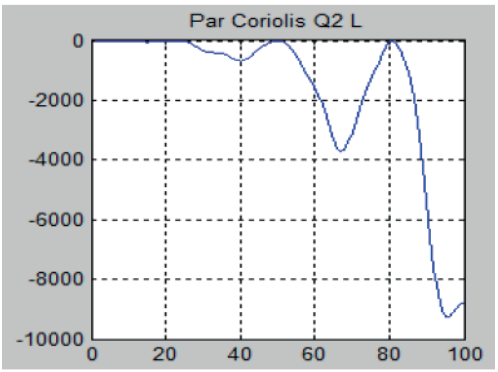


Figura 14. Par Gravedad Q1 obtenido por Lagrange.

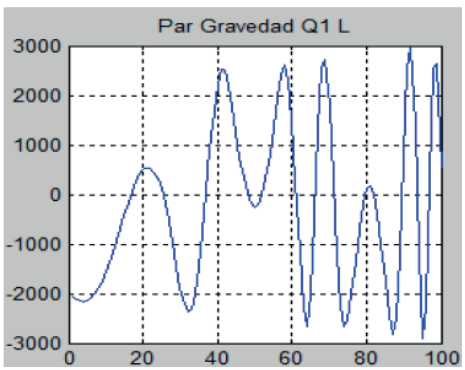
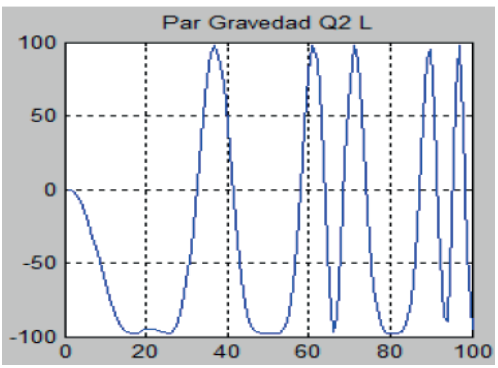


Figura 15. Par Gravedad Q2 obtenido por Lagrange.



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proceso metodológico presentado en figura 2 parte del análisis de la cinemática directa y diferencial obtenida del respectivo modelo cinemático; el cual permite obtener los pares que deben aplicados en las respectivas articulaciones para que el robot pueda realizar sus prestaciones correctamente. La contribución a estos pares posee distintas aportaciones observando (12); a saber: 1) el par que debe vencer efectos inerciales donde la matriz de inercia M(q) es una generalización del momento de inercia clásico de un cuerpo (primer término $\boldsymbol{M}$ **(q)** $\ddot{q}$**)**, 2) el par que debe vencer efectos centrífugos y de Coriolis (segundo término $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\,\dot{\boldsymbol{q}}$) y 3) el par que debe vencer efectos gravitatorios (tercer término G(q)). De la discusión de (12) se observan algunas cuestiones de interés para el proceso de diseño; la aportación del par inercial aumenta en la medida que se tengan eslabones con valores mayores de J_1 y J_2, y mayores distancias de los CM a los centros de giro (l_{c1} y l_{c2}). Cabe igual razonamiento para la contribución del par gravitacional al par total. También se deben tener en

cuenta los aportes realizados por las fuerzas centrífugas y de Coriolis; si se efectúa el producto matricial en el tercer término de (12), por un lado, se obtienen los pares centrífugos: $[m_2 l_1 l_{c2} S_2]\ \dot{q}_1^2 - [m_2 l_1 l_{c2} S_2]\ \dot{q}_2^2$ (dependen del cuadrado de las velocidades y coinciden con los elementos de la diagonal principal (i = j) de la matriz C), y por otro, los pares de Coriolis:

$-2m_2 l_1 l_{c2} S_2$ (dependen del producto de dos velocidades de articulaciones distintas y coinciden con los elementos que están fuera de la diagonal principal (i ǂ j) de la matriz C). Se realizó una simulación resolución del modelo dinámico inverso de un robot mediante un algoritmo computacional. De dicho proceso se puede constatar los efectos centrífugos y de Coriolis, además de los efectos gravitatorios en un robot planar de 2GDL. Por lo que el modelo matemático se corrobora con el algoritmo computacional.

4. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se extraen del presente artículo son las siguientes:

Se usan las ecuaciones de Lagrange como uno de los métodos superiores de la Mecánica Analítica, para la obtención de ecuaciones diferenciales bien estructuradas en donde se visualizan los pares y fuerzas que intervienen (inercia, Coriolis, gravedad). Estas ecuaciones permiten obtener el Modelo Dinámico del robot en función de sus variables articulares y derivando la función de energía que depende de estas variables.

Este método tiene la ventaja de que no intervienen las fuerzas de ligadura, dado que hace uso de balance de energía. Por otra parte, no es eficiente computacionalmente, dado que el algoritmo es de un orden de complejidad O(n4); dado que se realizan más operaciones por la potencia cuarta del número de gdl.

Las futuras líneas en las que está trabajando este grupo de investigación son las siguientes:

1. Análisis de la dinámica de los sistemas de trasmisión, actuadores y equipos electrónicos.
2. Probar el modelo analítico obtenido en banco experimental donde los eslabones, actuadores y sistemas de trasmisión se construyen en el laboratorio de nuestra facultad.
3. Diseño y evaluación del control dinámico del robot; en principio, mediante el desarrollo de algoritmos de control que lleven en forma asintótica a cero el vector de error de posicionamiento ($q_{error} = q_{deseada} - q_{actual}$).

4. Determinar valores de parámetros dinámicos del robot (momentos de inercia, centros de masa y coeficientes de fricción), mediante técnicas de identificación paramétrica, tales como modelos de regresión.

BIBLIOGRAFÍA

Barrientos, Antonio; Peñín, Luis Felipe; Balaguer Carlos y Aracil Rafael. "Fundamentos de Robótica". Madrid – España. Segunda Edición. Editorial McGraw – Hill. Madrid – España (2007).

Craig, J. J (1989) "Introduction to Robotics". Ed. Addison Wesley, Reading, MA.

Gates Bill. "A Robot in Every Home". Scientific American Journal. EEUU. (2007).

Ollero Baturone, A. "Robótica Manipuladores y robots móviles". Barcelona – España. Ed. Alfaomega – Marcombo. Barcelona – España (2007).

Paul, R. P., "Homogeneous Transformations – Robot Manipulators: Mathematics, Programming & Control". The MIT Press, Massachussets. (1981).

Reyes Cortés, F., "Robótica – Control de Robots Manipuladores". Ed. Alfaomega, México, 2011.

Spong, Mark; Hutchinson, Seth (2006) "Robot Modeling and Control". Ed. John Wiley & Sons.

CAPÍTULO 2

APPLICATION OF VIBRATION EFFECTS IN TECHNICAL DIAGNOSTICS AND IDENTIFICATION

Data de submissão: 07/09/2026
Data de aceite: 22/09/2026

Vitalijs Beresnevics
Assoc. Professor
Riga Technical University
Riga, Latvia
https://orcid.org/0000-0002-2904-2381

ABSTRACT: Vibration phenomena, traditionally regarded as undesirable effects in mechanical systems, can also provide valuable information for the development of advanced diagnostic and identification techniques. This paper explores the application of vibration-based methods in technical diagnostics and parameter identification of engineering systems. The study discusses functional and testing vibrodiagnostic approaches for detecting structural damage, including defects in machine components, aircraft structures, and mechanical elements, through the analysis of vibration responses and natural frequency variations. In addition, vibration-based identification techniques are presented as indirect measurement methods for estimating relevant parameters of technical objects, including tire pressure and the quantity of materials stored in reservoirs. Experimental examples demonstrate the potential of frequency-based approaches for reliable condition assessment and monitoring without direct intervention in the analyzed systems. The results highlight the versatility of vibration effects as informative signals for non-destructive testing, predictive maintenance, and the development of innovative engineering solutions.

KEYWORDS: vibration diagnostics; structural health monitoring; non-destructive testing; vibration-based identification; frequency analysis; mechanical systems; predictive maintenance.

APLICACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA VIBRACIÓN EN EL DIAGNÓSTICO Y LA IDENTIFICACIÓN TÉCNICA

RESUMEN: Los fenómenos vibratorios, tradicionalmente considerados efectos indeseables en los sistemas mecánicos, también pueden proporcionar información valiosa para el desarrollo de técnicas avanzadas de diagnóstico e identificación. Este trabajo analiza la aplicación de métodos basados en vibraciones para el diagnóstico técnico y la identificación de parámetros en sistemas de ingeniería. Se presentan enfoques de vibrodiagnóstico funcional y de ensayo para la detección de daños estructurales, incluyendo defectos en componentes de máquinas, estructuras aeronáuticas y elementos mecánicos, mediante el análisis de respuestas vibratorias y variaciones de

frecuencias naturales. Asimismo, se describen técnicas de identificación basadas en vibraciones como métodos de medición indirecta para estimar parámetros relevantes de objetos técnicos, incluyendo la presión de neumáticos y la cantidad de materiales almacenados en depósitos. Los ejemplos experimentales demuestran el potencial de los enfoques basados en frecuencia para la evaluación confiable del estado de los sistemas y su monitoreo sin intervención directa sobre los elementos analizados. Los resultados evidencian la versatilidad de los efectos vibratorios como señales informativas para ensayos no destructivos, mantenimiento predictivo y el desarrollo de soluciones innovadoras en ingeniería.
PALABRAS CLAVE: diagnóstico de vibraciones; monitoreo de la integridad estructural; ensayos no destructivos; identificación basada en vibraciones; análisis de frecuencia; sistemas mecánicos; mantenimiento predictivo.

1. INTRODUCTION

Most of us are familiar with vibration from everyday life. For example, when a pendulum is set in motion, it vibrates. A stretched guitar string also vibrates. And when a vehicle drives on uneven dirt road, it begins to vibrate intensely, creating a discomfort for passengers. But geological activity can cause strong vibrations in the form of earthquakes.

In industry, there is a special type of vibration: machine vibration. In most cases, machine vibration is unwanted. Most machine vibrations are caused by repetitive forces, such as the rotation of unbalanced, misaligned, worn, or improperly driven machine components. Two examples of unwanted machine vibrations are shown in Fig. 1 and 2.

Fig. 1. Vibrating motor.

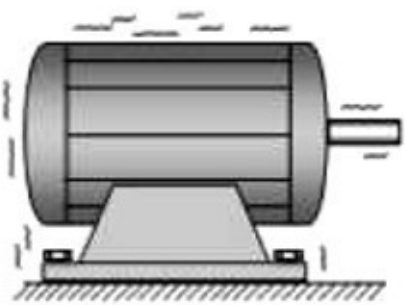


Fig. 2. Vibrating belt.



In the examples presented, vibration is a harmful phenomenon that must be combated. Many methods and technical means have been developed to suppress or completely eliminate vibrations in machines [1]. This article presents other area of vibration engineering, which considers vibration effects as useful phenomena, when the use of vibration allows the development of new original machines and technologies. Further,

various vibration technologies will be analyzed here, aimed at solving problems such as detection of damage in machines, identification of parameters of technical objects, etc.

2. VIBRATION DIAGNOSTICS

Vibration diagnostics is a system of methods and technical means, intended for damage detection in technical objects by the analysis of their vibrations [2]. And characteristics of the studied oscillatory process in machine, containing information on its technical condition, are usually called as diagnostic signs of defects. A defect in machine or structure is understood as any discrepancy between the parameters and characteristics of an object with their specified or required values. A defect is understood as any discrepancy between the current (measuring) characteristics of testing object and their specified or required values. Typical examples of defects are as follows: fatigue cracks (Fig. 3); violation of the integrity of the adhesive joint in multilayer structures (Fig. 4); changes in the physical and mechanical properties of the material during use (Fig. 5); and a number of other deviations of the operational characteristics of the object from its standard values.

Fig. 3. Fatigue crack.



Fig. 4. Poorly adhered layers of material in a multilayer compound. (1 – working head; 2, 4 – layers of material; 3 – adhesive).

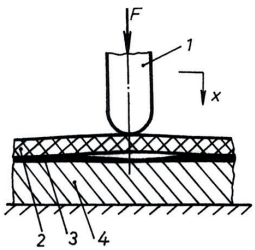


Fig. 5. Pipe corrosion.



Depending on the nature of testing object, the vibration control procedure can be based on either functional diagnostics or test diagnostics.

2.1. FUNCTIONAL DIAGNOSTICS

Functional diagnostics is based on the registration and analysis of vibration signals emitted by a testing object during its operation. Typical objects diagnosed functionally are rolling bearings (Fig. 6). Excitation of vibrations in bearings is caused by the waviness and ovality of the running tracks, the faces of the rolling elements (balls) and the spread of

their diameters. Besides, wear of the bearings causes an increase in the gap, which leads to impact interaction between the shaft and the rolling elements, which contributes to an increase in the amplitude of the vibration signal.

Fig. 6. Damage in rolling bearing.

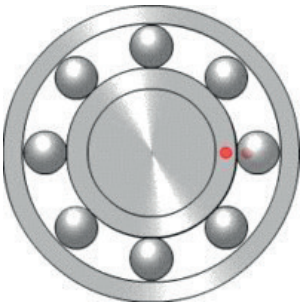
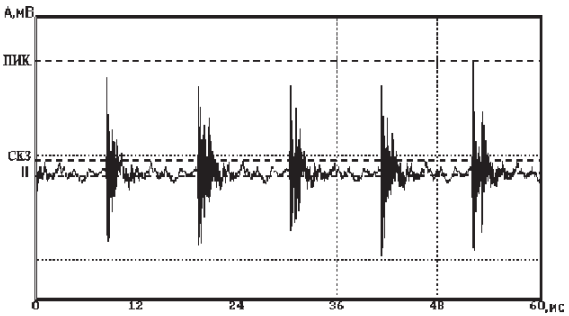


Fig. 7. Characteristic vibration time response of the damaged bearing.



Wear of balls, rollers or raceway causes an increase in the gap, which leads to impact interaction between the shaft and the rolling elements of bearing. This is the reason of shock interaction of shaft with bearing, which contributes to the appearance of characteristic peak pulses on the recorded time response (Fig. 7).

Another example of an object diagnosed functionally is gear transmission (Fig. 8). Vibration excitation in operating gear transmission can be caused by a variable loading of gear tooth with the so-called “tooth” frequency, imbalance of rotating parts, kinematic errors, etc. To detect damages in gear transmission, vibration monitoring in gear box is used (Fig. 9). Typical signs of damages in gear teeth and kinematic meshing errors can be realized in the redistribution of energy across frequencies, changes in spectral power density (Fig. 10).

Fig. 8. Gear transmission: 1, 2 – gear wheels.

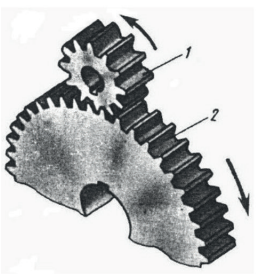


Fig. 9. Vibration monitoring in gear box.

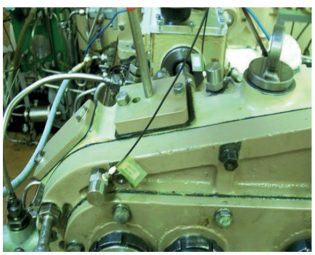
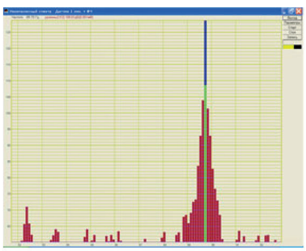


Fig. 10. Damage detection by the analysis of spectral power density.



But not all testing objects generate vibration during operation, and even if vibration is generated, it is often of low intensity, which makes it difficult to measure and identify. Taken together, all this limits the practical application of functional vibration diagnostics methods.

2.2. TESTING VIBRODIAGNOSTICS

Testing vibrodiagnostics is based on a special action on an object of diagnose with the external standard vibration signal (for example, harmonic signal) and on further analysis of this signal transformation. The parameters of the test excitation are specially selected so as, on the one hand, to increase the informativeness and sensitivity of diagnostic signs, and on the other hand, not to cause irreversible changes in the technical condition of the system being diagnosed. Test diagnostic methods are used in cases where the object either does not emit vibration at all during operation, or if recording and analysis of vibration characteristics in operating mode is difficult or even impossible. Typical engineering objects of testing vibrodiagnostics are aircraft structures, pipelines, rod structures and trusses, multilayer materials and others.

Examples of characteristic defects detected by testing diagnostic methods are fatigue cracks in elements of aircraft structures and trusses (Fig. 11), slackening of bolted joints (Fig. 12), destruction of rivetted joints, etc.

Fig. 11. Crack detection in cantilever beam.

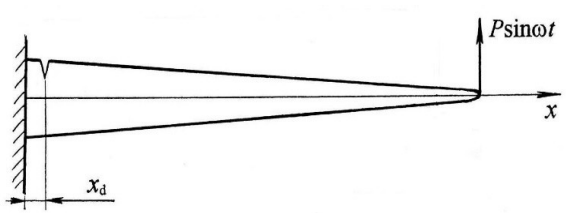
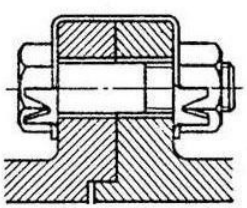


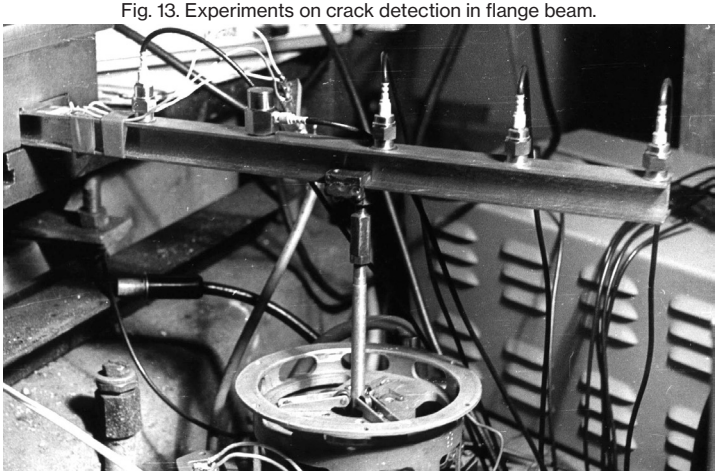
Fig. 12. Slackening of bolted joints.



To detect damage, it is necessary to act on a testing object with the external testing harmonic force $P\sin\omega t$ and to analyze the variation in system's vibration response. In all above-mentioned examples appearance of defect is accompanied with reduction of rigidity k of testing object. But the total mass m of the system practically is not changed. Therefore, using the simplified model with one degree of freedom, it can be concluded that due to the defect a reduction in the natural frequency $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ is expected. This property is used as a principal basis for diagnostics of defects. The relevant method of non-destructive testing is called as the frequency method [3].

The advantage of the frequency method lies in the invariance of testing results to possible variation of damping level in the system under study. In accordance with many experiments on real structures [3], in most cases appearance of defect promotes not only rigidity reduction, but also no predicted change (increase or decrease?) of damping level. For example, such conclusion was made on the base of laboratory experiments on crack detection in flange beam (Fig. 13). Therefore, as diagnostic sign of defects it was proposed to use natural (or resonant) frequencies which respond to system's rigidity reduction and simultaneously don't respond to variation of interference factor – damping.

Fig. 13. Experiments on crack detection in flange beam.

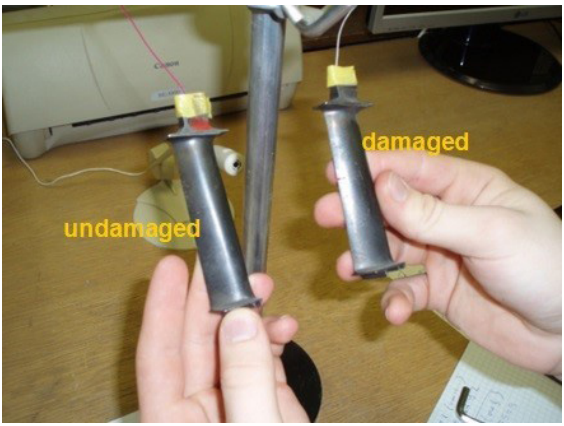


Damage diagnostics is based on monitoring of resonant frequencies' changing while the structure is in use. In the case of damage in typical engineering structures, its resonant frequency usually is reduced by 1-1.5%. Therefore, to identify such small changes of resonant frequencies, high-precision and expensive instrumentation has to be used.

For stable and reliable detection of small developing defects in structural elements, a programmable diagnostic system (PDS) equipped with a specialized computer program HA has been developed at the Riga Technical University [4]. PDS was successfully used in several aviation companies for damage detection in stringers and airframes of aircrafts, stabilizer spar of helicopters, etc.

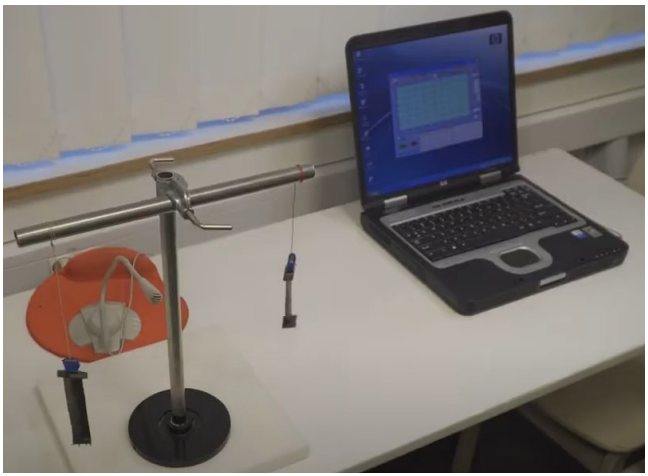
In this paper, the capabilities of PDS are demonstrated on the example of student's research work on damage detection in turbine blades. Two identical turbine blades, made of the same material, with the same shape and dimensions, are used for laboratory experiments. The first blade does not contain a visually visible defect, but the second blade has a specially created damage that occupies about 14% of the cross-sectional area of an undamaged blade (Fig. 14).

Fig. 14. Turbine blades (damaged and undamaged) for laboratory experiments.



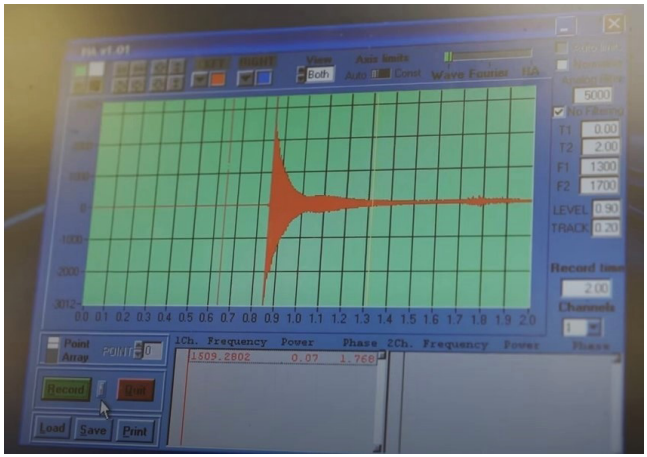
Each blade with a thread is suspended in a special stand (Fig. 15). Free elastic oscillations in the blade material can be induced by a light impact using a small hammer. At the same time, free acoustic oscillations are induced in the surrounding air environment. Furthermore, the dominant frequency of the acoustic oscillations is the same as the frequency of internal elastic oscillations in blade's material. Therefore, to determine the natural frequency of the blade, it is possible to record and analyze acoustic oscillations using a microphone sensor. The sensor is connected to a personal computer equipped with specialized software HA.

Fig. 15. Laboratory stand.



On the computer screen (Fig. 16), it is possible to see the main window of the HA program and the recorded process of damped acoustic oscillations for the undamaged blade. Qualitatively the same is a process of damped acoustic oscillations that occurs as a result of an impact on the side surface of a damaged blade.

Fig. 16. Damped acoustic oscillations recorded by the computer program HA.



Using the HA program, the blades' natural frequencies corresponding to the recorded damped acoustic oscillations were determined. Pictures taken from computer screen are shown in Fig. 17 and Fig. 18.

Fig. 17. Determination by the HA program of natural frequency f_0 of the undamaged blade.

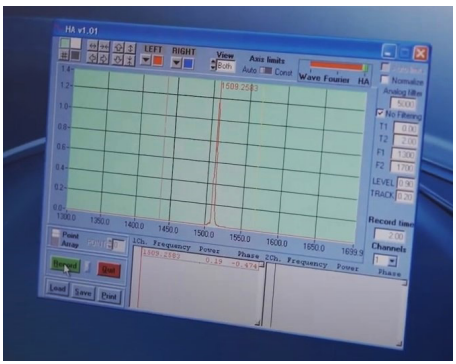
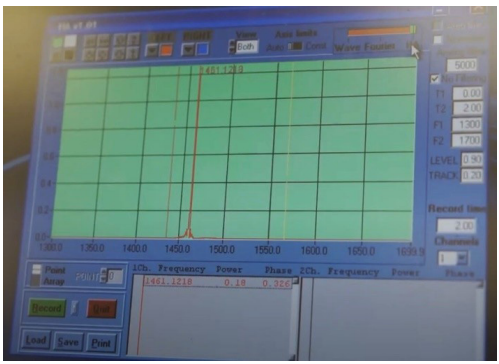


Fig. 18. Determination by the HA program of natural frequency f_{0d} of the damaged blade.



Experiments with undamaged and damaged blades were repeated 10 times to assess the effect of random factors on the distribution of results. Mean values of natural frequencies are as follows: for the undamaged blade $\overline{f}_0$ = 1507.4389 Hz; for the damaged blade $\overline{f}_{0d}$= 1461.8532 Hz. Relative deviation between the mean values of frequencies $\overline{f}_0$ and $\overline{f}_{0d}$ is about 3%. Besides, after mathematical processing of the experimental data, using the Student's *t*-distribution [5], it can be concluded that with confidence 95% the natural frequencies f_{0d} and f_0 of the damaged and undamaged blades are in the following ranges:

$$1460{,}64 < f_{od} < 1463{,}06 \text{ (Hz) and } 1506{,}69 < f_0 < 1508{,}19 \text{ (Hz).}$$

Therefore, the frequency intervals do not overlap. This means that a damaged blade can be reliably distinguished from an undamaged one using the frequency method.

It should be noted, however, that the practical implementation of frequency methods involves the need to use particularly precise (and therefore very expensive) control and measuring instrumentation. This significantly limits the scope of application of these methods. Moreover, in recent years, nonlinear nondestructive testing methods have become increasingly popular, and the essence of nonlinear approach to diagnostics is described in specialized literature [3, 6-8].

3. VIBRATION IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF TECHNICAL OBJECTS

The tasks of technical diagnostics are closely interrelated and are often intertwined with parametric identification problems. Vibration identification means solving the problem of synthesis a model of an object based on data of its dynamic behavior under the known external vibration excitation. Based on vibration methods, parameters of a mathematical model that describe the dynamic behavior of an object can be identified (parametric identification).

Parametric identification may be defined as a form of indirect mechanical measurement. Some practical examples of vibration identification are discussed below.

3.1. MEASURING OF AIR PRESSURE IN PNEUMATIC TIRES

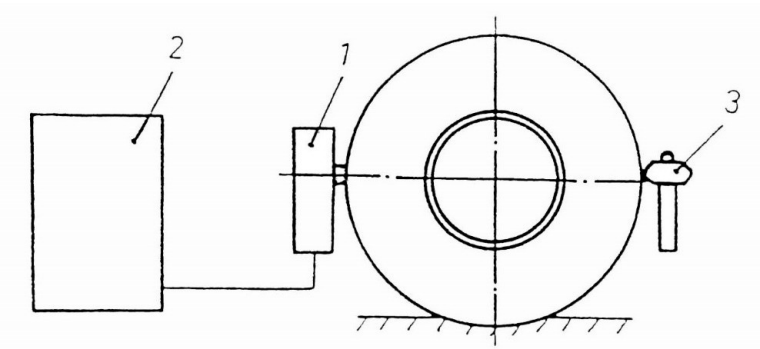
The economical operation of a vehicle is largely determined by fuel consumption, the need for which, in addition to other factors (vehicle design and weight, speed, tire design, road condition), significantly depends on the air pressure in the tires. According to work [9], a decrease in air pressure in vehicle tires by 10–15% (against the value recommended by the manufacturer) leads to an increase in driving resistance and an increase in fuel consumption by 3.5–4%. In addition, prolonged use of tires with reduced air pressure leads to their premature destruction, reduces the reliability and service life of the vehicle, significantly impairs its handling and reduces road safety. Therefore, the current rules for operating vehicles do not allow the air pressure in tires to deviate from the nominal value by more than ±0.02 MPa for trucks and ±0.01 MPa for passenger cars. To meet existing requirements, it is necessary to monitor systematically the air pressure in vehicle tires.

The traditional method of measuring pressure, which involves opening the valve on each of the monitored tires and then using a standard pressure gauge, is

very labor-intensive. The complexity of control increases even more when determining the air pressure in the internal pneumatic tires of the paired wheels of trucks, buses, trolleybuses, since in this case it additionally becomes necessary to remove the outer wheels from the vehicle to provide access to internal tire valves. Taking into account the above, the development of methods and means for operational express pressure testing that do not require opening the valve is of great importance (especially for large automobile enterprises).

The proposed express control method is based on the dependence of the tire stiffness in the radial direction on the air pressure in it. A change in rigidity, in turn, leads to a change in the frequency of free vibrations of the system consisting of an elastic wall of the tire and the mass of the tip applied to it from the outside. The block diagram of a device for measuring air pressure in tires is shown in Fig. 19. The measuring tip contains a piezoelectric accelerometer, which converts vibrations of the elastic shell into a proportional electrical signal. The control unit records the free oscillation frequency of the tire-measuring tip system, the value of which is uniquely related to the air pressure in the tire.

Fig. 19. Block diagram of the device for measuring air pressure in tires: 1 – measuring tip; 2 – control unit; 3 – hammer.



When a tire is pulsed with shock loading, as experimental studies have shown, several modes of its free vibrations are excited at once. However, the most intense oscillations are in the first proper mode (see Fig. 20). Therefore, it was decided to take the frequency characteristics of this mode as the basis for the diagnostic procedure.

Typical time curve for damped free oscillations of pneumatic tire in the *x* direction is shown in Fig. 21. Air pressure measurement is based on recording of period T or frequency $f = 1/T$ during service of transport vehicle and comparison of measurement results with the tire calibration curve preliminary constructed.

Fig. 20. The first natural mode of elastic vibrations of a tire.

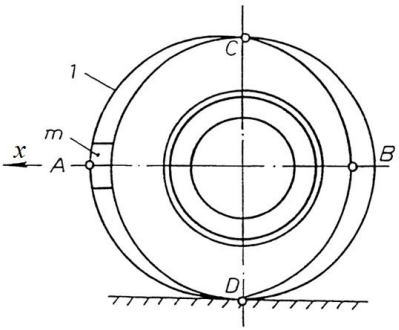
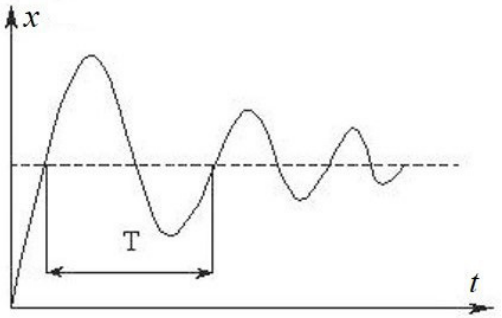


Fig. 21. Damped free oscillations of pneumatic tire in the x direction.



Based on the dynamic analysis of the system “tire-measuring tip”, a device for express monitoring of air pressure in tires was developed in Riga Technical University [3]. The general view of the device is shown in Fig. 22.

Fig. 22. General view of the device for express monitoring of air pressure in tires.

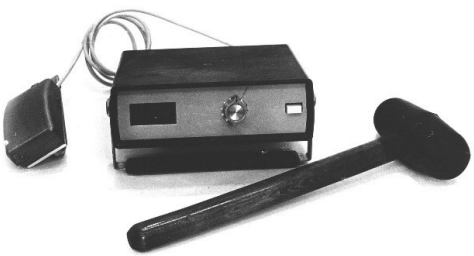
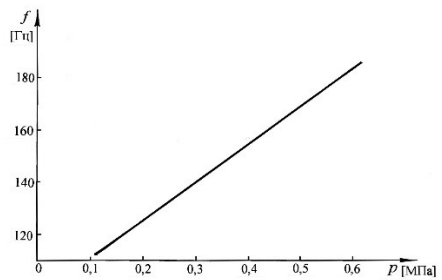


Fig. 23. Calibration curve for measuring air pressure *p* in the tire of model 8A.



To operate the device, you must first calibrate it for each type of tire. This is due to the significant difference between tires of different sizes, both in their rigidity characteristics and in the required nominal pressure. As an example, Fig. 23 shows a calibration curve obtained for the tire with standard sizes 900 x 300 (model 8A) from the landing gear of an aircraft. The calibration curve can be entered in electronic form into the device’s memory, which allows the readings to be displayed directly in pressure units (for example, in MPa).

Tests of the device carried out at motor transport and aviation enterprises of Latvia for various types of tires confirmed its reliability and acceptable measurement accuracy. Statistical analysis of the measurement results shows that for all tire models considered, the relative measurement error does not exceed ±5%, which is less than the maximum errors of standard pressure gauges.

3.2. DETERMINATION OF AMOUNT OF LIQUID OR GRANULAR MATERIALS KEPT IN STORAGE TANKS

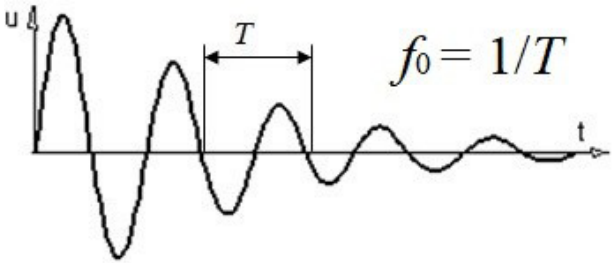
In industry and technology, it is very often necessary to determine the amount of liquid or bulk material in various types of reservoirs (cisterns, tanks, cans, gas cylinders, etc.). Traditional methods involve opening the cover of the cistern (or another reservoir) (see Fig. 24), which is inconvenient and time-consuming. Another approach to determining the amount of material in reservoirs is proposed, and it is based on the analysis of the frequency characteristics of the testing reservoir.

Fig. 24. Tank with liquid.



The testing procedure is performed by striking the wall of the tank with a hammer, which induces system's free damped elastic oscillations (see Fig. 25) with natural frequency f_0. When the amount of material inside the tank changes, the equivalent mass m of the system will change, but the stiffness k practically remains the same (the stiffness k mainly depends on the reservoir material properties and its dimensions). Therefore, using the simplified model of the reservoir with one degree of freedom ($f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{k/m}$), it can be concluded that as the amount of material m inside the tank increases, the natural frequency f_0 of the system is expected to decrease.

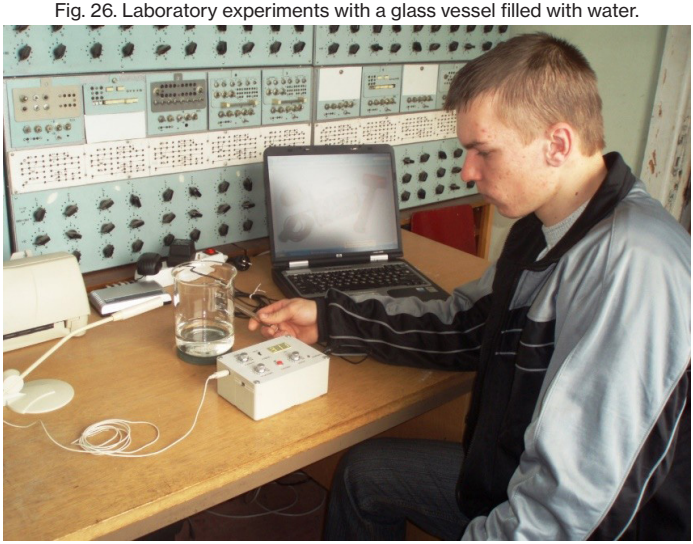
Fig. 25. Damped free elastic oscillation of tank's wall.



This vibration effect is used as an informative vibration sign for determining the amount of material in different types of reservoirs. The corresponding measurement algorithm is called the frequency method. In this paper, the capabilities of frequency method are demonstrated on the example of student's research work on determination of amount of water in a glass vessel.

For conducting laboratory experiments, a glass vessel with milliliter divisions on the surface (Fig. 26), which allows to determine approximately the amount of water inside the vessel. The purpose of the experiments is to obtain initial data for the construction of the calibration curve, i.e. relationships between the water volume V in the vessel and the natural frequency f_0 of the system.

Fig. 26. Laboratory experiments with a glass vessel filled with water.

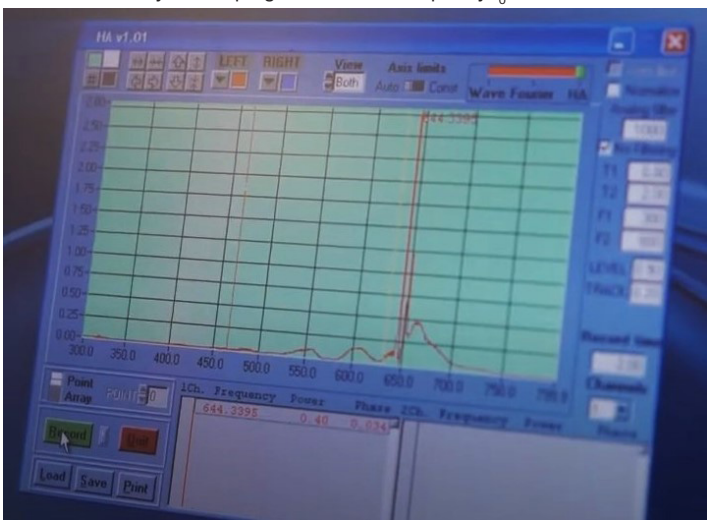


The experiments were carried out with the empty vessel and with vessel filled with different volumes of water. Free elastic oscillations in the vessel material were induced by a light lateral impact using a small hammer (Fig. 26). At the same time, free

acoustic oscillations are induced in the surrounding air environment. Furthermore, the dominant frequency of the acoustic oscillations is the same as the frequency of internal elastic oscillations in the vessel's material. Therefore, to determine the natural frequency of the vessel with water, it is possible to record and analyze acoustic oscillations using a microphone sensor. The sensor is connected to a personal computer equipped with specialized software HA [4].

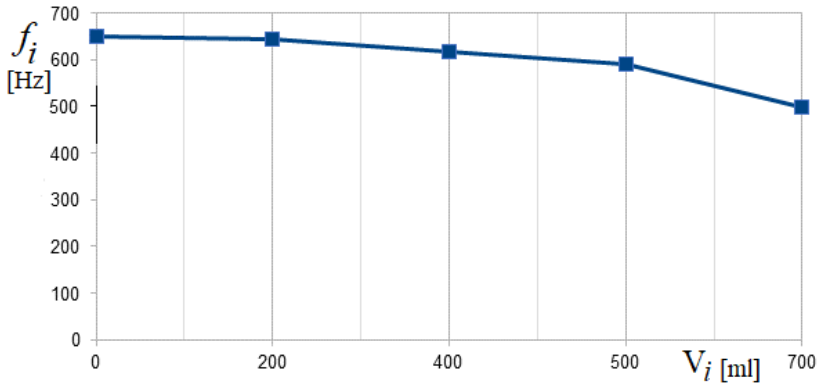
Using the HA program, the natural frequencies of vessel with different amount of water were determined. Experiments with each water volume V were repeated 10 times to assess the effect of random factors on the distribution of results. As an example, Fig. 27 presents main screen of the HA program with the testing result for volume V = 200 ml (in this experiment f_0 = 644.3395 Hz).

Fig. 27. Determination by the HA program of natural frequency f_0 for water volume V = 200 ml.



After mathematical processing of experimental data, a calibration curve was drawn – the relationship between the volume of water V_i in the vessel and the mean value of the natural frequency f_{0i} (Fig. 28). As it is seen, in the volume interval 0 - 200 ml, the curve $V(f_{0i})$ is very flat, which indicates the relatively low accuracy of the frequency method in this volume V interval. The frequency method ensures sufficient increasing of measurement accuracy at larger amounts of water in the vessel (V > 200 ml).

Fig. 28. Calibration curve for the glass vessel filled with water.



In general, laboratory experiments confirm the performance of the proposed frequency method and the possibility of its use in various engineering applications.

4. CONCLUSION

The paper discusses a number of examples on practical application of vibration effects to solve problems of technical diagnostics and identification. However, the possibilities for using vibration are much wider and are not limited to the examples considered here. In accordance with experimental and theoretical studies [10, 11], vibration also can be useful in different technological processes (for example, vibration compaction and processing of granular material and soils, vibration cleaning of details, vibration emptying of loading hoppers, vibration transporting of materials, etc.).

Artificial intelligence (Chat GPT) can be used when developing new vibration devices. For example, engineers and designers can use GPT to generate and explore a wide range of design options for their vibration device. By providing specific design criteria, the model can generate possible solutions that meet those requirements, helping to accelerate the design process.

Besides, GPT can assist in researching the market potential for a new vibration device, identifying potential competitors, and assessing the demand for such a device.

REFERENCES

1. Kolovsky M.Z. Nonlinear Dynamics of Active and Passive Systems of Vibration Protection (Foundations of Engineering Mechanics). Berlin: Springier, 1999.

2. Vibration-based Techniques for Damage Detection and Localisation in Engineering Structures. Edited by Ali S. Nobari. – London: World Scientific, Imperial College, UK, 2018.

3. Tsyfansky S., Beresnevich V., Lushnikov B. Methods and Means of Nonlinear Vibrodiagnostics. - Riga: RTU Publishing House, 2011.

4. Cifanskis S. Programmable Diagnostic System PDS-10 / High Tech in Latvia 2004. – Riga: Publishing House AGB, 2004, p. 31.

5. Beckwith T.G., Marangoni R.D., Lienhard J.H. Mechanical Measurements. 6th Edition. – New Jersey 07458, Pearson Education Inc., 2007.

6. Bovsunovsky A. P., Surace C. Considerations regarding superharmonic vibrations of a cracked beam and the variation in damping caused by the presence of the crack // Journal of Sound and Vibration, 2005, vol. 288, p. 865 – 886.

7. Tsyfansky S. L., Beresnevich V. I. Detection of fatigue cracks in flexible geometrically non-linear bars by vibration monitoring // Journal of Sound and Vibration, 1998, vol. 213, No. 1, p. 159 – 168.

8. Tsyfansky S. L., Beresnevich V. I. Non-linear vibration method for detection of fatigue cracks in aircraft wings // Journal of Sound and Vibration, 2000, vol. 236, No. 1, p. 49 – 60.

9. Erohov V.I. Economical vehicle operation. Berlin, 2006.

10. Tsyfansky S. L., Beresnevich V. I. The control of the operating condition of a subharmonic vibromachine // Journal of Sound and Vibration, 1997, vol. 203, No. 3, p. 495 – 503.

11. Beresnevich V. I., Tsyfansky S. L. Characteristic properties of subharmonic oscillations and their application in vibration engineering // Journal of Sound and Vibration, 2005, vol. 280, No. 3 – 5, p. 579 – 593.

CAPÍTULO 3

CORTE POR CIZALLAMIENTO DE UNA SILUETA CIRCULAR BAJO CONDICIONES DE MÍNIMO Y MÁXIMO MATERIAL[1]

Data de submissão: 24/08/2026
Data de aceite: 10/09/2026

Juan Compeán Rodríguez
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de San Luis Potosí
Departamento de Ciencias Básicas
Soledad de Graciano Sánchez
San Luis Potosí, México
https://orcid.org/0009-0003-7394-8935

Pedro de Jesús García Zugasti
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de San Luis Potosí
Departamento de Metal Mecánica
Soledad de Graciano Sánchez
San Luis Potosí, México
https://orcid.org/0000-0001-8232-0080

Enrique Alejandro Vázquez Hernández
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de San Luis Potosí
Departamento de Metal Mecánica
Soledad de Graciano Sánchez
San Luis Potosí, México
https://orcid.org/0000-0002-5778-2395

José de Jesús Navarro Delgado
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de San Luis Potosí
Departamento de Metal Mecánica
Soledad de Graciano Sánchez
San Luis Potosí, México
https://orcid.org/0009-0005-8179-6307

Yolanda Rodríguez Corpus
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de San Luis Potosí
Departamento de Ciencias Básicas
Soledad de Graciano Sánchez
San Luis Potosí, México
https://orcid.org/0009-0004-9225-9630

[1] Artículo derivado del trabajo de tesis de maestría en Ingeniería Mecánica.

RESUMEN: En este estudio sobre la operación de corte con punzón de una silueta de forma circular, utilizando un ángulo de cizallamiento en la matriz de la herramienta para reducir la fuerza de corte, se proponen dos ecuaciones que contemplan dos condiciones dimensionales particulares: a) La condición de mínimo espesor de material a ser cizallado; es decir, cuando el espesor del material a cortar no rebasa o es menor al cateto vertical del ángulo de cizallamiento y b) Condición de máximo espesor de material a ser cizallado; es decir, cuando el espesor del material a cortar rebasa o es mayor que el cateto vertical del ángulo de cizallamiento.
PALABRAS CLAVE*:* cizallamiento; silueta; fuerza de corte.

CUTTING OPERATION OF A CIRCULAR SHEET METAL BLANK UNDER MINIMUM AND MAXIMUM MATERIAL CONDITIONS

ABSTRACT: In this study on the punch cutting operation of a circular sheet metal blank, using a tooling cut with a die shear angle to reduce

the cutting force, two equations are proposed that contemplate two particular dimensional conditions: a) The condition of minimum thickness of material to be sheared; that is, when the thickness of the material to be cut does not exceed or is less than the side opposite to the shearing angle and b) Condition of maximum thickness of the material to be sheared; that is, when the thickness of the material to be cut exceeds or is greater than the side opposite to the shear angle.
KEYWORDS: punching; blank; cutting force.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de producción de corte con punzón de discos (Bawa, 2007, p. 386) ha sido estudiado poniendo énfasis en variables, como el ángulo de cizallamiento, porque reduce la fuerza de corte para dicha operación y esto es porque los materiales a procesar cada vez mejoran en características como sus propiedades mecánicas que los hacen más durables, pero también más resistentes para procesar. Se han realizado estudios para encontrar cuánto se reduce la fuerza de corte conforme el ángulo de cizallamiento es aumentado, por ejemplo, el experimento que más se asemeja a las condiciones del presente estudio (Kutuniva et al., 2012, pp. 1359-1364), consiste en hacer cortes de figuras circulares utilizando matrices de corte con ángulo de cizallamiento, con la diferencia de que el punzón en vez de terminar en punta, este terminaba en una cara plana de 1 mm con el propósito de reforzar el punzón. En otro estudio (Gürün et al., 2016, pp. 19-28) se experimentó con 5 diferentes ángulos de cizallamiento en el punzón y propusieron un modelo de lógica difusa que "calcula" la reducción en fuerza de corte a determinado ángulo de cizallamiento, sin concluir claramente el porqué de dicha reducción de fuerza, en un trabajo similar (Karjalainen et al., 2007, pp. 209-216) se experimentó con punzones cuya cara de corte estaba fabricada con forma senoidal y propusieron un modelo analítico que consistía en considerar que la fuerza de corte se asumiera "proporcional al área de cizallamiento.", aunque sí plantearon un "modelo analítico" el fenómeno que estudiaron es de consideraciones geométricas diferentes a las de éste estudio y de costo elevado en comparación con la geometría comúnmente utilizada.

El presente trabajo está basado en una propuesta para determinar la "ecuación de fuerza de corte con un ángulo de cizallamiento para una figura circular" (De Jesús Navarro, 2015), mediante la manipulación de los cuerpos tridimensionales de la geometría involucrada en el proceso (ver figura 1), empleando un modelo en el cual el ángulo de cizallamiento divide la cara de corte en dos secciones, siendo el área mayor la que se emplea para contabilizar la fuerza de cizallamiento (ver figura 2). En el modelo matemático utilizado se incluyeron las variables de la geometría y del proceso (ver figura 3) para deducir la expresión fuerza de corte siguiente:

$$V = \tau \cdot [(2 \cdot \pi \cdot r \cdot e) - (4 \cdot r^2 \cdot tan\alpha)] \quad (1)$$

Donde el ángulo de cizallamiento de la herramienta es (ver figura 3):

$$\alpha = arctan\frac{e}{b} \quad (2)$$

Los parámetros que intervienen en las ecuaciones 1 y 2 son:

τ = esfuerzo cortante promedio en la sección, para todo punto localizado en la sección.

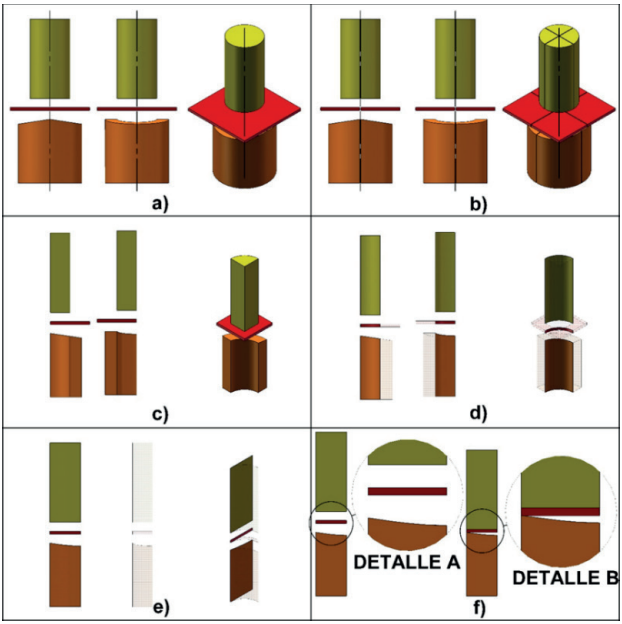
r = diámetro de la figura de corte dividido a la mitad.

e = espesor del material a cortar.

α = ángulo de cizallamiento.

b = La cuarta parte del perímetro de la figura circular $= \frac{\pi \cdot r}{2}$

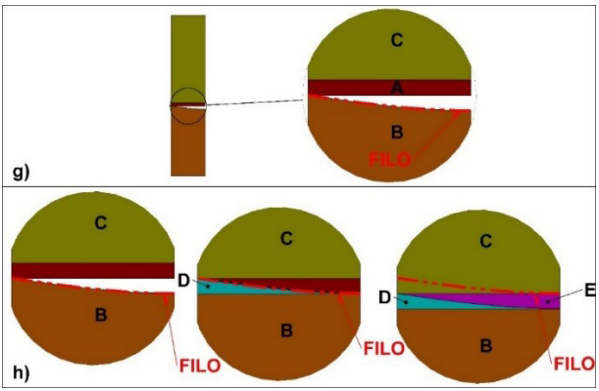
Figura 1. Proceso de corte con punzón y matriz incluyendo los cuerpos tridimensionales de la geometría involucrada en el proceso. De arriba a abajo y de izquierda a derecha en cada recuadro: a) Vista frontal, lateral e isométrica de la geometría de estudio, b) Seccionamiento de la geometría de estudio en 4 partes iguales, c) Eliminación de 3 partes de cada pieza, d) Señalización de las áreas tridimensionales que intervienen en el fenómeno del cizallamiento, e) Desdobles a dos dimensiones de las áreas que intervienen en el fenómeno y f) DETALLE A: áreas antes de interactuar, DETALLE B: áreas en contacto para interactuar.



En este estudio acerca del cizallamiento de una figura circular se incorporan dos nuevas condiciones de operación: a) mínimo y b) máximo espesor de material (e) respecto del cateto vertical (h) del ángulo de cizallamiento (α) como se muestra en la figura 4, con el propósito de desarrollar una ecuación de cizallamiento que pueda emplearse cuando

la matriz tenga un ángulo de cizallamiento para el máximo y mínimo espesor de material a cortar mediante el desenvolvimiento de la geometría tridimensional implicada a un plano bidimensional que permitirá identificar el área de mayor tamaño que podría ser utilizada.

Figura 2. Parte g) Localización de áreas A, B y C y filo de cara B y parte h) Modelo para calcular la fuerza de corte considerando que el ángulo de cizallamiento divide la cara de corte en dos secciones, de las cuales, el área más grande (área E) es la que se toma en cuenta para calcular la fuerza de cizallamiento (de izquierda a derecha, interacción de áreas en el cizallamiento).



2. ESFUERZO Y FUERZA NECESARIA PARA LA OPERACIÓN DE CIZALLADO

La ecuación para calcular el esfuerzo cortante promedio (Saanouni et al., 2010, pp. 535-550) en la sección de corte (sección a cizallar) conociendo la fuerza de corte *V* y el área a cizallar *A* es la siguiente:

$$\tau = \frac{V}{A} \tag{3}$$

Si se requiere calcular la fuerza de corte, en este caso denotándola como ***F*,** necesaria para realizar la operación de cizallado (Saanouni et al., 2010, pp. 535-550) se emplea la expresión:

$$F = \frac{t^2 \cdot K_s}{2 \cdot \tan \alpha} \tag{4}$$

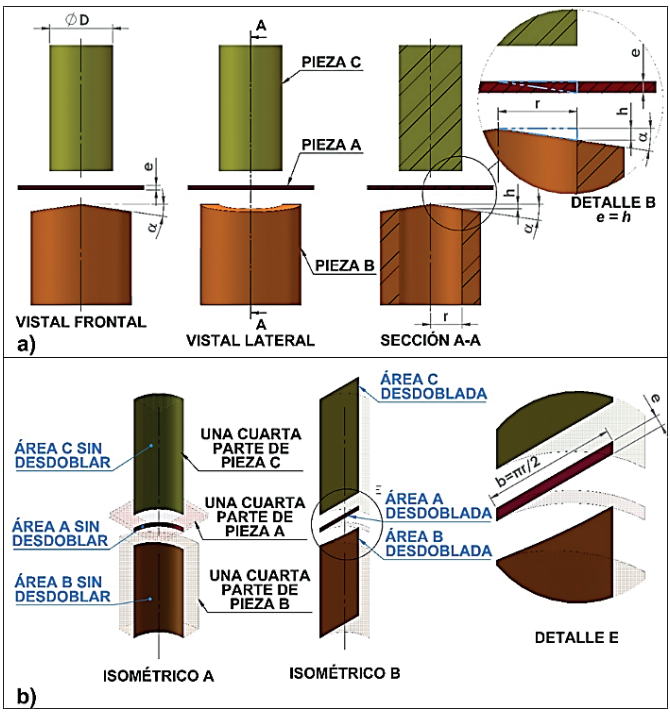
Donde *Ks* es la resistencia al corte del material cizallado, *t* el espesor de la lámina y el ángulo de cizallamiento α es obtenido con la ecuación 2 (ver figura 4).

2.1. ÁREA TOTAL "CONTABILIZADA" PARA EL CÁLCULO DE FUERZA DE CORTE CUANDO $\alpha > arcTan\frac{t}{b}$.

Para contabilizar la totalidad del área en cizallamiento, se emplea el concepto de resistencia en la sección a cortar y carga necesaria para vencer esta resistencia

cuando $\alpha > arcTan\frac{t}{b}$, como se estableció en (Saanouni et al., 2010, pp. 535-550), a partir de un modelo de resistencia de materiales para calcular la fuerza de corte tomando en cuenta que el ángulo de cizallamiento divide la cara de corte en dos secciones, de las cuales, el área más grande es la que se "contabiliza" para calcular la fuerza de cizallamiento (ver figura 2).

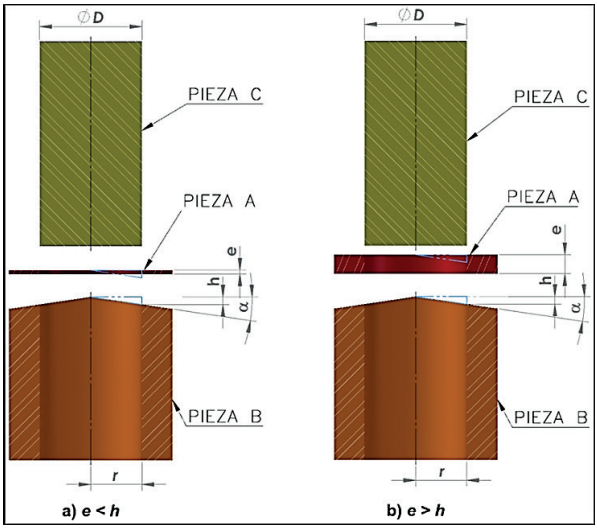
Figura 3. a) Vistas frontal, lateral, sección A-A y detalle B de las piezas junto con las variables que intervienen en la ecuación (e, r, h y α), nótese que se trazó un triángulo rectángulo de lados r y h tanto en el dado matriz (PIEZA B) como en la pieza a cortar (PIEZA A) para mostrar que el cateto h y e se trataron como iguales para el estudio en cuestión y b) Isométrico A: una cuarta parte de cada pieza y áreas sin desdoblar, Isométrico B: áreas desdobladas y detalle E mostrando las longitudes b y e.



3. MÉTODO

El desarrollo de las expresiones derivadas de cada caso enunciado consiste en simplificar la geometría tridimensional y luego hacer la deducción de la fuerza necesaria para lograr el cizallado, esto para dos condiciones geométricas (ver figura 4).

Figura 4. Operación de corte a) Condición de mínimo espesor de material a cortar, b) Condición de máximo espesor de material a cortar. En ambos casos se muestra el triángulo rectángulo (color azul) formado por el cateto horizontal r y el cateto vertical h cuyos lados forman el ángulo de afilamiento a en el dado matriz (PIEZA B), puede observarse también la dimensión del cateto vertical h respecto al espesor del material a cortar e (PIEZA A).



+

Caso 1: máximo material, es decir, cuando el espesor de material a cortar e es mayor a h:

$$e > h \tag{5}$$

Caso 2: mínimo material, es decir, cuando el espesor del material a cortar e es menor a h:

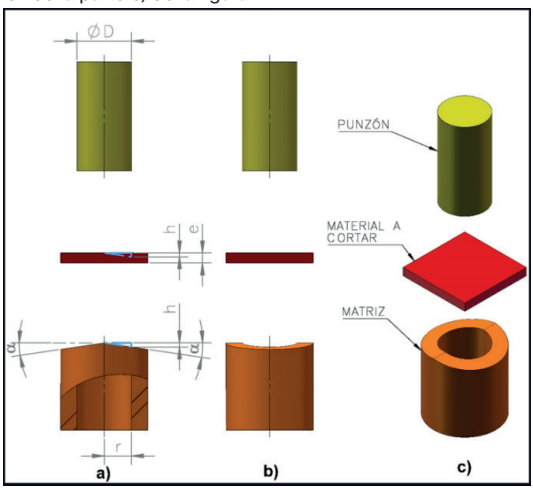
$$e < h \tag{6}$$

3.1. CASO 1. CONDICIÓN DE MÁXIMO ESPESOR DE MATERIAL CORTAR: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA HERRAMIENTA *e* > *h*.

De la figura 4, se extrae la parte b) correspondiente al caso de estudio y en la figura 5 se presenta la vista frontal, lateral e isométrica, las características geométricas de esta condición son:

- El material por cortar es plano (ver figura 5)
- La zona de corte tiene perfil circular, es decir, la matriz tiene hueco cilíndrico y el punzón es un cilindro sólido (ver figura 5c)
- La matriz de corte tiene ángulo de cizallamiento a (ver figura 5)
- El espesor de material a cortar es mayor comparado con el cateto vertical h del triángulo rectángulo del cual forman parte los lados r, h y el ángulo a.

Figura 5. CONDICIÓN DE MÁXIMO ESPESOR DE MATERIAL A CORTAR. Características geométricas de la herramienta $e > h$. Extracción de la parte b) de la figura 4.



En la figura 6 se muestra la misma secuencia de pasos de la figura 5, y el procedimiento para simplificar la geometría involucrada en la operación de corte, que consiste en: particionar la geometría para (aprovechando la simetría), eliminar tres cuartas partes de la geometría (también aprovechando simetría en dos ejes), desdoblar la geometría de superficies tridimensionales a bidimensionales y proceder con el análisis de la fuerza de cizallamiento (ver figura 7):

Basado en la figura 6i se procede al cálculo para contabilizar el área mayor que se opone al cizallamiento, observando que la curva desdoblada de la matriz no es una línea recta sino una curva, la ecuación que describe esta curva se estableció como: $u(x) = h\,\mathrm{sen}\dfrac{x}{r}$ (Saanouni et al., 2010, pp. 535-550), y el área de la región limitada por la gráfica de $u(x) = h\,\mathrm{sen}\dfrac{x}{r}$ y el eje x en $0 \le x \le \dfrac{\pi r}{2}$ (ver figura 7A) es:

$$A = r^2\,Tan\alpha \tag{7}$$

Esta área se apoya en los vértices A, B y C como se muestra en la figura 7, a esta área es necesario sumarle el área rectangular por encima de la línea que une los puntos A y C, resultando el área E (ver figura 7B):

$$\acute{A}REA\ E = \left((e-h) \times \frac{\pi r}{2}\right) + (r^2 tan\alpha) \tag{8}$$

El área E es el área mayor que se opone al cizallamiento durante la operación de corte, es decir la fuerza necesaria para iniciar y sostener el cizallamiento de toda el área a cortar se calcula con esta área.

Sustituyendo la ecuación 8 en la 3 y multiplicando por 4 debido a simplificación de 3 partes de la geometría antes realizada, se obtiene la expresión:

$$V = 4\tau\left(\left((e-h)\times\frac{\pi r}{2}\right)+(r^2 tan\alpha)\right) \quad (9)$$

Simplificando se obtiene la fuerza de corte para la condición de máximo material $e>h$ siguiente:

$$V = \tau\left(\left(2\pi r(e-h)\right)+(4r^2 tan\alpha)\right) \quad (10)$$

3.2. CASO 2. CONDICIÓN DE MÍNIMO ESPESOR DE MATERIAL CORTAR: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA HERRAMIENTA *e<h.*

De la figura 4, se extrae ahora la parte a) correspondiente al caso a estudiar y se presenta a continuación en vista frontal, lateral e isométrica en la figura 8, las características geométricas de esta condición son:

- El material por cortar es plano (ver figura 8).
- La zona de corte tiene perfil circular, es decir, la matriz tiene hueco cilíndrico y el punzón es un cilindro sólido (ver figura 8c).
- La matriz de corte tiene ángulo de cizallamiento α (ver figura 8)
- El espesor de material a cortar e es menor comparado con el cateto vertical h del triángulo rectángulo del cual forman parte los lados r, h y el ángulo α.

Figura 6. Características geométricas de la herramienta e>h. Procedimiento para simplificar la geometría. En la imagen i) las superficies están en contacto para comenzar el cizallamiento.

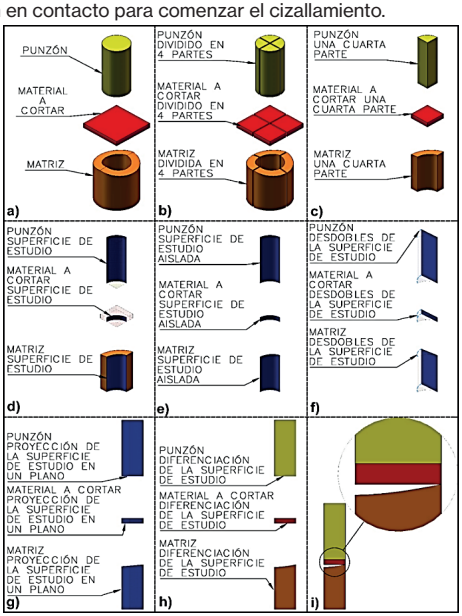
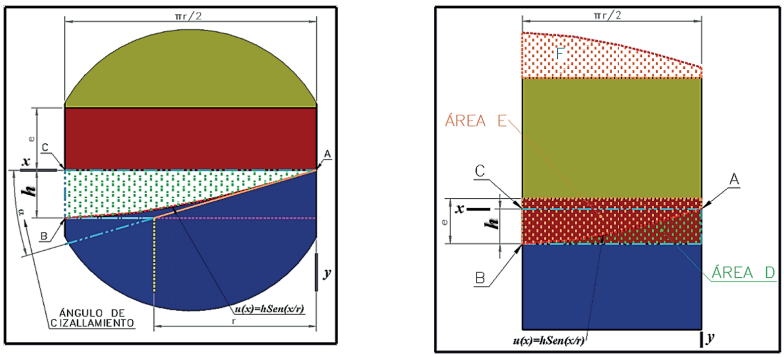


Figura 7. Características geométricas de la herramienta e>h . La figura contiene la ecuación de la curva que proviene del desdoblamiento a dos dimensiones de la cuarta parte de la matriz y la localización de los ejes *x* y *y*.



A) B)

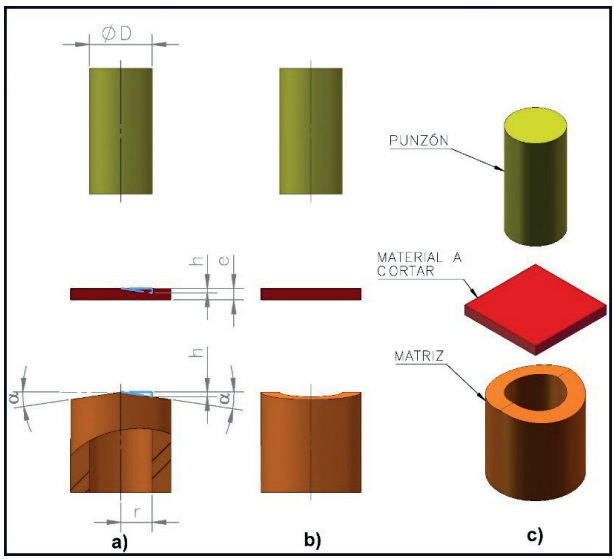
Para el caso 2 el procedimiento para encontrar las ecuaciones para esta condición geométrica es similar al caso 1 antes planteado, además, como la geometría de la matriz no ha cambiado, se tomará como referencia nuevamente la figura 6.

En la figura 9 se ha trazado el perfil de la curva desdoblada de la matriz y las condiciones geométricas establecidas, que permite contabilizar el área mayor que se opone al cizallamiento. Para este caso el área mayor identificada es E (Ver figura 9B).

El área E está limitada por la curva descrita por el perfil desdoblado (ec. 11) y los ejes *x* y *y* (Ver figura 9B).

$$u(x) = h\,\mathrm{sen}\frac{x}{r} \tag{11}$$

Figura 8. CONDICIÓN DE MÍNIMO ESPESOR DE MATERIAL A CORTAR. Características geométricas de la herramienta *e<h* . Extracción de la parte a) de la figura 4.



Identificado los límites del área E, se procede al cálculo de la integral desde x=0 a x=b= $\frac{e}{\tan\alpha}$ expresada como:

$$ÁREA\ E = \int_0^{r\,\sin^{-1}\left(\frac{e}{h}\right)} h \sin\left(\frac{x}{r}\right) \tag{12}$$

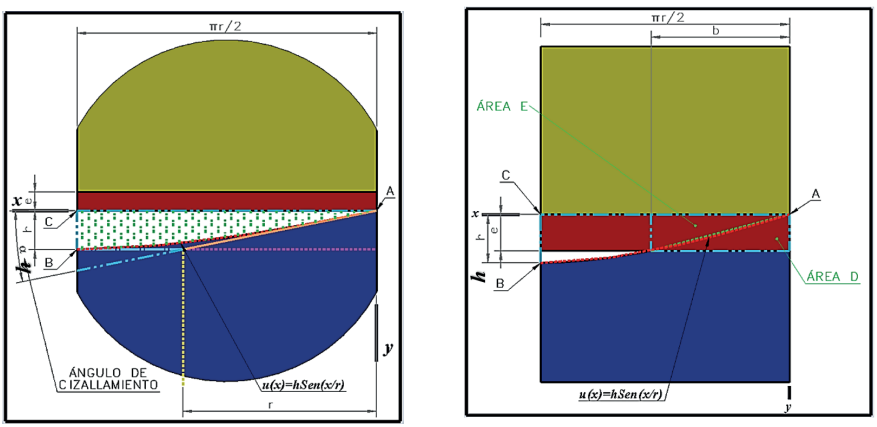
El resultado de la ecuación 12, es el área bajo la curva (ec. 11) la cual es también el área E:

$$ÁREA\ E = h\left[1 - \left(\cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{e}{h}\right)\right)\right)\right] \tag{13}$$

Sustituyendo en la ecuación 3, y recordando también que se tiene que multiplicar por 4 debido a la simplificación de 3 partes de la geometría original, se obtiene la expresión:

$$V = \tau A = \tau \times 4A = \tau \times 4(ÁREA\ E) = 4\tau h\left[1 - \left(\cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{e}{h}\right)\right)\right)\right] \tag{14}$$

Figura 9. Características geométricas de la herramienta e<h. La figura contiene la ecuación de la curva que proviene del desdoblamiento a dos dimensiones de la cuarta parte de la matriz y la localización de los ejes *x* y *y*. En la parte B) los puntos de intersección de la curva con la sección a cortar generan un rectángulo de lados *b* y *e*.



Simplificando la ecuación 14 se obtiene la ecuación para calcular la fuerza de corte bajo la condición geométrica de mínimo espesor de material a cortar $e<h$:

$$V = 4\tau h\left[1 - \left(\cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{e}{h}\right)\right)\right)\right] \tag{15}$$

4. VALIDACIÓN Y VERIFICACIÓN DE LAS EXPRESIONES PARA LOS CASOS 1 Y 2, CONSIDERANDO ESTUDIOS REPORTADOS EN LA LITERATURA ESPECIALIZADA

Con la finalidad de verificar y validar el concepto de contabilizar el área de mayor tamaño en oposición a ser cizallada que se propone en este trabajo para el desarrollo de las expresiones de los casos 1 y 2, se encontraron en la literatura especializada otros estudios experimentales que son similares a las condiciones geométricas estudiadas hasta ahora. A continuación, se muestran los resultados de la comparación de los resultados del presente estudio (ámbito del trabajo) con los resultados de un estudio "experimental" seleccionado (Gürün et al., 2016, pp. 19-28).

La geometría del ámbito del trabajo (De Jesús Navarro, 2015) en la que se considera $e = h$, se compara con la geometría utilizada en el estudio experimental en la cual se utilizan dos condiciones: $e < h$ y $e > h$. La similitud existente entre ambos trabajos es el ángulo de afilamiento simétrico con respecto al plano A (ver figura 10), mientras que la diferencia es el ángulo de afilamiento aplicado en la matriz (ver figura 10a) con $e = h$ en el caso del ámbito de trabajo y para el estudio experimental, el ángulo de afilamiento se aplica en el punzón (ver figura 10b) con $e < h$ y $e > h$.

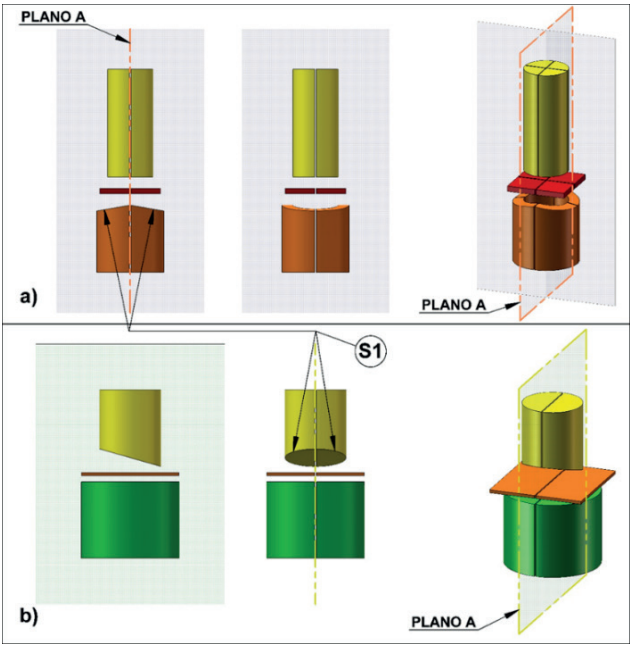
5. RESULTADOS DE CALCULAR LA FUERZA DE CORTE DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL APLICANDO EL CONCEPTO DE LA CONTABILIZACIÓN DE LA TOTALIDAD DEL ÁREA MÁS GRANDE EN OPOSICIÓN A SER CIZALLADA

El procedimiento para elaborar la gráfica de la figura 11 y la tabla 2 que se muestra a continuación, consiste en primero obtener los datos de entrada del experimento (ver Tabla 1) y posteriormente se calcula el promedio del esfuerzo cortante con α = 0°, la forma de calcularlo es utilizando la ecuación 3 con los datos de entrada de la Tabla 1 y también los resultados ya reportados (Gürün et al., 2016, pp. 19-28) de la fuerza de corte experimental con α = 0°:

El valor de esfuerzo cortante experimental empleando la ecuación 3, es:

$$\tau_{experimental\ con\ \alpha=0°} = \frac{V_{experimental}}{A_{teórica}} = \frac{\sum_{n=1}^{n}\left(V_{experimental}/_{n}\right)}{A_{teórica}} \tag{16}$$

Figura 10. Características geométricas: a) Geometría ámbito del trabajo (Bawa, 2007, p. 386) y b) Geometría del estudio experimental (Karjalainen et al., 2007, pp. 209-216).



En donde:

$\tau_{experimental\ con\ \alpha=0°}$= *esfuerzo cortante experimental con* α=0°

$V_{experimental}$ = *fuerza cortante experimental*

$A_{teórica}$ = *área de cortante teórica con* α=0°

n=*número de prueba*

Tabla 1. Datos de entrada de estudio experimental (Gürün et al., 2016, pp. 19-28).

DATOS DE ENTRADA		
MATERIAL		DIN EN 10130-DC01
ESPESOR	(e)	1.0 mm
DIÁMETRO DE CORTE	(Ø)	20.0 mm
YIELD STRENGTH (ESFUERZO DE FLUENCIA)	(τ)	286.0 MPa

Con el valor de $\tau_{experimental\ con\ \alpha=0°}$ se calcula el valor de la fuerza cortante teórica (ecuación 17) que después será graficado junto con la fuerza cortante experimental, para cada una de las 32 pruebas realizadas (ver figura 11).

$$V_{teórica\ con\ \alpha=0°} = \tau_{experimental\ con\ \alpha=0°} \times A_{teórica\ con\ \alpha=0°} \quad (17)$$

Cálculo de $\tau_{experimental\ con\ \alpha=0°}$:

$$\tau_{experimental\ con\ \alpha=0°} = \frac{(1735.3\ N)}{(\pi * 20mm * 1mm)} = 27.6\ Mpa$$

Cálculo de $V_{teórica\ con\ \alpha=0°}$:

$$V_{teórica\ con\ \alpha=0°} = 27.6\ Mpa \times (\pi * 20mm * 1mm) = 1734\ N$$

Graficando $V_{teórica\ con\ \alpha=0°}$ y $V_{experimental\ con\ \alpha=0°}$ se obtiene la gráfica de resultados de la figura 11, los resultados muestran que el promedio de todas las diferencias es de 18.8% o expresado en otras palabras, el concepto de calcular la fuerza de corte contabilizando el área de mayor tamaño en oposición a ser cizallada se acerca en promedio en un 81.2% a la obtenida en el experimento, véase Tabla 2.

Figura 11. Gráfica de fuerza de corte teórica vs experimental con $\alpha=0$.

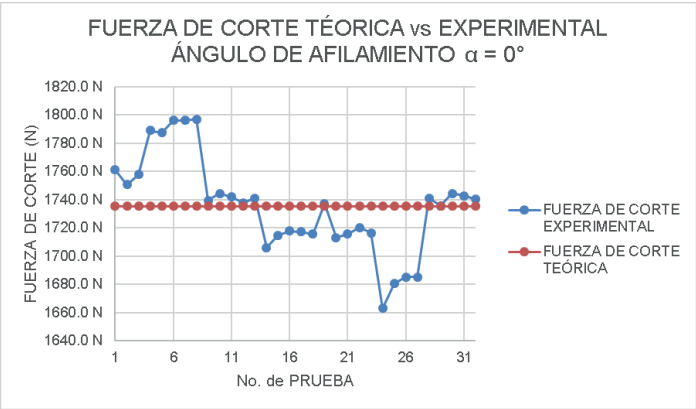


Tabla 2. Diferencia entre fuerza cortante teórica vs experimental con $\alpha=0$.

PRUEBA	ÁNGULO DE CIZALLAMIENTO (°)	FUERZA DE CORTE EXPERIMENTAL PROMEDIO (N)	FUERZA DE CORTE TEÓRICA PROMEDIO (N)	DIFERENCIA (%)
1	0	1761.0	1734	1.5
2		1750.6		0.94
3		1757.8		1.35
...				
32		1740.3		0.36
		PROMEDIO: 1735.3		PROMEDIO: 1.47

6. CONCLUSIONES

La investigación realizada contempló la literatura sin encontrar alguna expresión para el cálculo de la fuerza de cizallado como las ecuaciones 10 y 15 que se proponen en este trabajo

Se mostró que el concepto de calcular la fuerza de cizallamiento contabilizando el área de mayor tamaño en el cizallamiento tiene una aproximación, respecto al estudio experimental considerado, de 81.2%.

Es posible realizar el cálculo de la fuerza de corte de una figura circular para las condiciones geométricas estudiadas, dato que servirá para la toma de decisiones correctas en los siguientes casos: Si el espesor de material a cortar es más grande que el cateto vertical h del ángulo de cizallamiento (**Condición $e>h$**) se conocerá la fuerza necesaria para cizallar la figura circular y se podrá seleccionar el equipo adecuado para la manufactura del corte. Si el espesor de material a cortar es más pequeño que el cateto vertical h del ángulo de cizallamiento (**Condición $e<h$**) se conocerá la fuerza necesaria para cizallar y se podrá decidir si es conveniente realizar el cizallado con ángulo de cizallamiento o no utilizarlo para no elevar el costo de fabricación de la herramienta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bawa, H. S. (2007). *Procesos de manufactura*. (p. 386). McGraw-Hill, ISBN 9789701061282.

De Jesús Navarro, I., Delgado. (2015). *Determinación de la ecuación de fuerza de corte con ángulo de cizallamiento para una figura circular* [Tesis de maestría]. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Luis Potosí.

Gürün, H., Göktaş, M., & Güldaş, A. (2016). Experimental Examination of Effects of Punch Angle and Clearance on Shearing Force and Estimation of Shearing Force Using Fuzzy Logic. *Transactions Of FAMENA*, *40*(3), 19-28. https://doi.org/10.21278/tof.40302

Karjalainen, J. A., Mäntyjärvi, K., & Juuso, M. (2007). Punching Force Reduction with Wave-Formed Tools. *Key Engineering Materials*, *344*, 209-216. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.344.209

Kutuniva, K., Karjalainen, J. A., & Mäntyjärvi, K. (2012). Effect of Convex Sheared Punch Geometry on Cutting Force of Ultra-High-Strength Steel. *Key Engineering Materials*, *504-506*, 1359-1364. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.504-506.1359

Saanouni, K., Belamri, N., & Autesserre, P. (2010). Finite element simulation of 3D sheet metal guillotining using advanced fully coupled elastoplastic-damage constitutive equations. *Finite Elements In Analysis And Design*, *46*(7), 535-550. https://doi.org/10.1016/j.finel.2010.02.002

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍA ERIM PARA INCREMENTO DE PRODUCCIÓN EN ÁREA DE ACABADO DE ROTORES[1]

Data de submissão: 24/08/2026
Data de aceite: 10/09/2026

Enrique Alejandro Vázquez Hernández
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de San Luis Potosí
Departamento de Metal Mecánica
Soledad de Graciano Sánchez
San Luis Potosí, México
https://orcid.org/0000-0002-5778-2395

Pedro de Jesús García Zugasti
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de San Luis Potosí
Departamento de Metal Mecánica
Soledad de Graciano Sánchez
San Luis Potosí, México
https://orcid.org/0000-0001-8232-0080

Juan Gabriel Sandoval Granja
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de San Luis Potosí
Departamento de Metal Mecánica
Soledad de Graciano Sánchez
San Luis Potosí, México
https://orcid.org/0009-0005-2656-7405

Gerardo García Liñán
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de San Luis Potosí
Departamento de Metal Mecánica
Soledad de Graciano Sánchez
San Luis Potosí, México
https://orcid.org/0000-0001-5505-7387

Luis Antonio Renovato Rivera
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de San Luis Potosí
Departamento de Metal Mecánica
Soledad de Graciano Sánchez
San Luis Potosí, México
https://orcid.org/0009-0009-5768-7388

RESUMEN: El presente proyecto se efectuó en una empresa del ramo automotriz dedicada a la manufactura de alternadores y marchas, dicha empresa presentaba en una de sus áreas más críticas e importantes baja eficiencia en su producción, a causa de la falta de disponibilidad de los equipos, paros no programados y movimientos innecesarios que realizaba el personal en sus áreas de trabajo, por lo cual para solucionar dicha problemática, se llevó a cabo el desarrollo de la metodología ERIM, la cual está basada en una de las técnicas de mejora Lean Manufacturing, el TPM (del inglés *Total Productive Maintenance*), el cual, a través de su adecuada implementación, permitió obtener resultados destacados, como fue el aumento de productividad, fiabilidad en los equipos y calidad en los productos, así como la reducción de mantenimientos correctivos, tiempos y costos operativos.

PALABRAS CLAVE: ERIM; fiabilidad; TPM.

[1] Artículo derivado del trabajo de tesis de maestría en Ingeniería Mecánica.

THE ERIM METHODOLOGY PERFORMANCE TO INCREASE PRODUCTION IN THE ROTOR FINISHING AREA

ABSTRACT: This project was carried out in a company in the automotive industry dedicated to the manufacture of alternators and gears, said company presented in one of its most critical and important areas low efficiency in its production, due to the lack of availability of the equipment, stoppages Unprogrammed and unnecessary movements carried out by personnel in their work areas, for which to solve this problem, the development of the ERIM (Equipment Reliability Improvement Management) methodology was carried out within the company, which is based on one of the Lean Manufacturing improvement techniques, the TPM (total productive maintenance), which, through its proper implementation, allowed to obtain outstanding results such as increased productivity, equipment reliability and product quality, as well as the reduction of corrective maintenance, times and operating costs.
KEYWORDS: ERIM; reliability; TPM.

1. INTRODUCCIÓN

La metodología ERIM denominada así dentro de la empresa por sus siglas en inglés *Equipment Reliability Improvement Management*), que en español significa "Administración de la Mejora de la Fiabilidad de los Equipos", es un proceso administrativo que se basa en la filosofía del Mantenimiento Productivo Total. Ambos métodos implican la participación total del personal por parte de la empresa, no sólo del personal de mantenimiento, como se tiene pensado erróneamente. El objetivo principal del ERIM, es mantener los equipos en total disposición con un alto grado de fiabilidad, para lograr obtener la cantidad máxima de piezas (rotores) con calidad y sin paros no programados (Dounce Villanueva & Dounce Tagle, 2016), (Ahuja & Kumar, 2009).

Los alcances que tuvo el desarrollo de este proyecto fueron favorables y valiosos tanto para la empresa como para los trabajadores, ya que por un lado a los operadores les permitió mejorar considerablemente su productividad, pues la presencia de numerosos paros no programados, el restablecimiento continuo de máquinas y los retrabajos, llegaban a causar ciertas frustraciones en los trabajadores por no alcanzar sus objetivos y no poder obtener bonificaciones otorgadas por dicho cumplimiento, y por otro lado en la empresa se logró alcanzar mejorar los indicadores de producción TRP (Tasa Real de Producción) y mantenimiento, el cual consta de dos indicadores; el primero, indicador de mantenibilidad MTTR (*Mean Time to Repair* = Tiempo Medio para restaurar) y el segundo, indicador de confiablidad MTBF (*Mean Time Between Failure*= Tiempo Medio Entre Fallas), que dicha empresa requería para cumplir con la alta demanda de productos de sus clientes.

Durante el desarrollo de la metodología ERIM se observaron varias irregularidades que afectaban a la producción indirectamente, ya que estas anomalías estaban provocando un riesgo principalmente a los operadores y a los equipos, entre ellos riesgos de seguridad (ergonómicos y exposición a contaminantes), por lo que se tuvieron que realizar estudios y algunas mejoras para evitarlos y optimizar la línea para lograr obtener un área de trabajo eficiente y segura. Este proyecto tuvo gran impacto en la zona de estudio, pues además de aumentar el TRP, mejoró el entorno laboral, debido a las condiciones en que se dejaron los equipos.

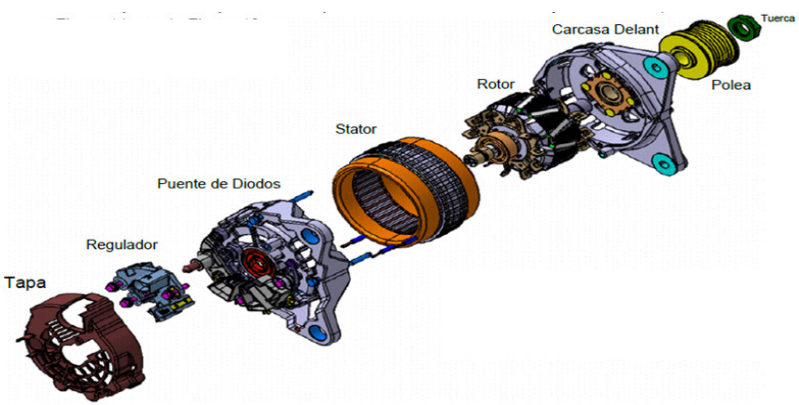
2. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Inicialmente, es importante dar a conocer el área de estudio "Rotor Acabado I" donde fue llevado a cabo el proyecto, así como las piezas a obtener en el proceso, con el fin de entender la importancia que tuvo el desarrollo e implementación de la metodología ERIM en la empresa.

La empresa se dedica a la fabricación de alternadores, la cual es proveedora de varios clientes de diferentes partes del mundo. Algunas de las empresas con las que trabaja son: Grupo BMW, Mazda, Suzuki, Volkswagen, Ford, Honda, Toyota, Nissan, Kia, Audi, GM, entre otras.

El alternador es un elemento generador de energía eléctrica, su función principal es convertir energía mecánica procedente del árbol de levas del motor de combustión interna a energía eléctrica para el consumo y la restitución de la carga de la batería del automóvil. Las partes principales que conforman un alternador son los siguientes elementos: polea, carcasa delantera y trasera, rotor, estator, puente rectificador, regulador y una tapa plástica. Dichos elementos pueden apreciarse en la vista explosionada de la Figura 1.

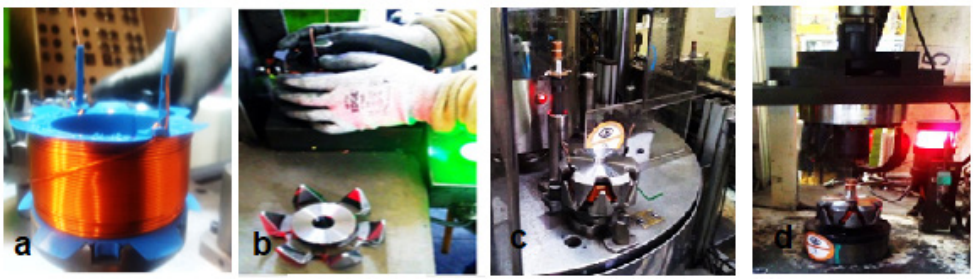
Figura 1. Vista explosionada de un alternador.



El área de estudio corresponde a aquella donde se realiza una de las partes más importantes del alternador: el rotor, cuyo proceso de fabricación es el siguiente:

El rotor se hace mediante el bobinado de hilo de cobre (Figura 2a), el cual se enrolla alrededor de un aislante plástico en bobinadoras manuales, luego este es cubierto por dos garras de acero conocidas como “Polos” (Figura 2b), a los cuales mediante máquinas de prensado se les inserta transversalmente una flecha con colector (Figura 2c) y un anillo de rotación (figura 2d).

Figura 2. a) Proceso de bobinado, b) Inserción de polos, c) inserción de flecha y d) Inserción de anillo de rotación.



Después, a este conjunto se le instala un ventilador (Figura 3a) y se le agrega resina en las terminales del bobinado (Figura 3b) para evitar un posible corto en la pieza. Si el rotor es un modelo especial, antes de entrar al horno se le agregan magnetos y ferritas entre las ranuras que quedan entra la unión de los polos (Figura 3c), con la finalidad de aumentar el campo magnético.

Luego, ese paquete pasa al área de Rotor Acabado I, la primera operación es introducir el paquete al horno (Figura 4a), donde el rotor es impregnado de barniz (agente antioxidante) y por medio de una máquina de grabado, se registra la fecha. Posteriormente, el rotor pasa a una operación de maquinado de polo y anillo para mejorar el acabado superficial, enseguida se le implanta un balero al rotor y es colocado en una máquina para balanceo dinámico (Figura 4b).

Figura 3. a) Instalación de ventilador, b) Suministro de resina en terminales y c) Inserción de magnetos.

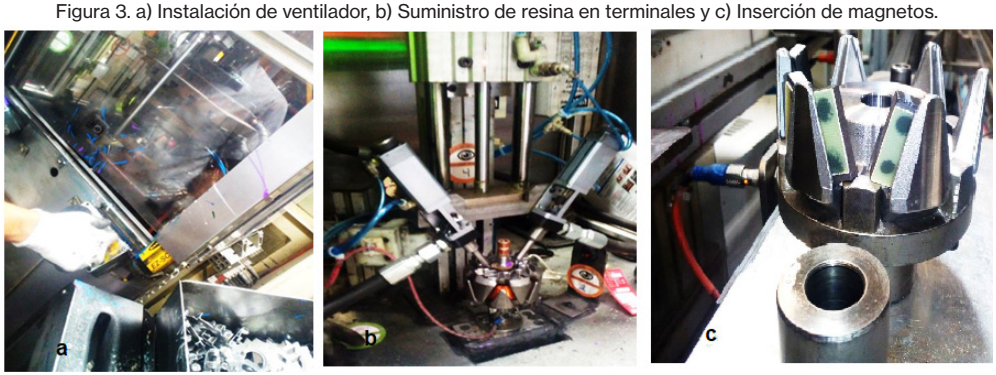
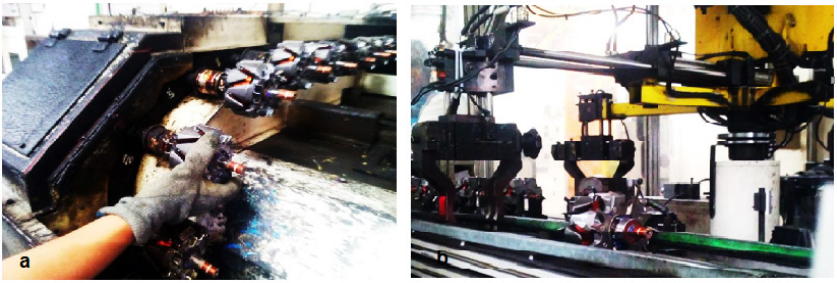


Figura 4. a) Introducción al horno y b) Balanceo dinámico del rotor.



Como último paso, para el acabado se realiza un maquinado al colector y enseguida es introducido a una cabina de pintura, dentro de la cual, a través de una cámara de visión se lleva a cabo una inspección final que permite identificar claramente al operador si el rotor presenta algún defecto por las operaciones efectuadas a lo largo del proceso. En caso de no presentar defectos, el rotor es depositado en contenedores para la siguiente operación de ensamble del alternador.

Como se mencionó anteriormente, el proceso de manufactura de los rotores es extenso que requiere de diferentes operaciones, pero sobre todo de tiempo, pues la pérdida de este genera una merma de ganancias, así como un aumento de costos operativos para la fabricación de sus productos, y en sus peores casos las pérdidas de los clientes por el desabasto de productos (Ahuja & Kumar, 2009).

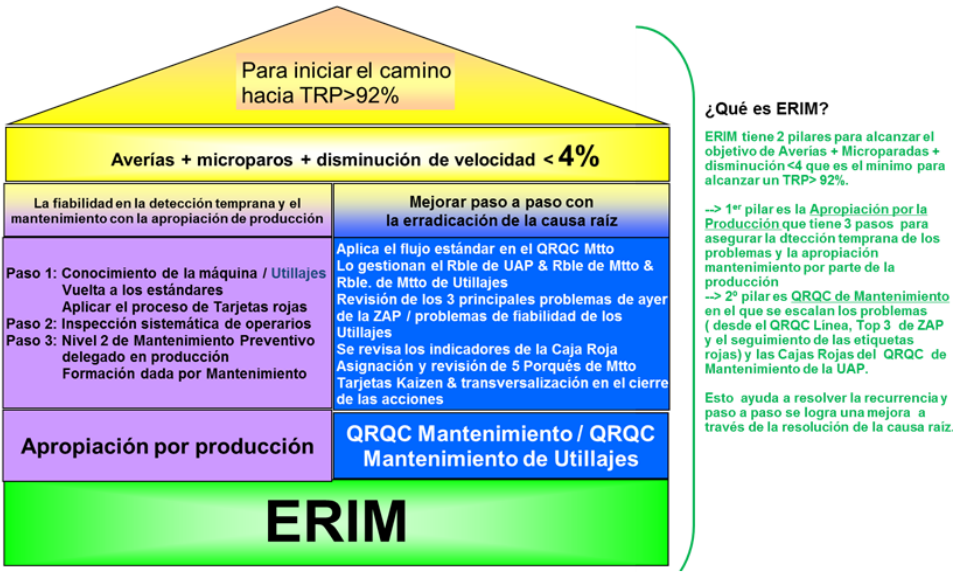
Por esta justa razón la empresa buscó un proceso de mejora continua a través de la implementación de técnicas de mejora como el TPM, KAIZEN, 5 s, para encontrarse totalmente en óptimas condiciones, esencialmente la de sus equipos. Durante varios meses en el área de rotor acabado I, se presentaba una baja productividad de rotores, sin embargo en un principio la disminución de dicho producto, no impactaba tanto a la empresa, debido al stock de material con el que contaba en su almacén de estas piezas para seguir fabricando alternadores, al mismo tiempo durante esta situación, los responsables del área procedieron a revisar los indicadores del área, observando que los indicadores de mantenimiento MTTR y MTBF, estaban también muy bajos debido a varias fallas en los equipos, por lo que se optó en implementar y desarrollar la metodología ERIM en el área.

3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA ERIM

El objetivo principal de la metodología ERIM es reducir o eliminar los paros no programados (fallas de máquina) con el fin de darles mayor fiabilidad a los equipos y de esta manera optimizar las líneas de producción para aumentar la productividad (Chan et al., 2003).

La metodología ERIM, es fundamentada en las bases de la filosofía del TPM (M. Cernek, J. Kovacs, 2016), el cual es un sistema de gestión que evita todo tipo de pérdidas durante la vida entera del sistema de producción, maximizando su eficacia e involucrando a todos los departamentos y a todo el personal desde operadores hasta la alta dirección. Conlleva una serie de pasos y procedimientos que requieren de tiempo y una preparación cuidadosa, en la Figura 5 se muestra de manera general el proceso de esta metodología con un esquema denominado "Templo ERIM".

Figura 5. Ilustración del proceso de la metodología ERIM. [Elaboración de la empresa]



4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como ya se indicó anteriormente, la línea de rotor acabado I fue seleccionada especialmente porque era un área crítica e importante para la empresa, y la problemática de bajo índice de producción no permitía alcanzar la demanda que se requería del producto, los indicadores de producción se encontraban muy por debajo de los objetivos planteados por la empresa, por lo que se preparó una gráfica de pérdidas de TRP, en valor de 59.01%, de los últimos meses (ver Figura 6), en la cual se reflejan los datos obtenidos sobre el comportamiento que ha tenido la línea con respecto a dicho indicador, se observa que en efecto una de las pérdidas que más afectan en la línea es debido a los paros no programados(fallos de máquina) pero también puede observarse que existe un 19% declarado como perdidas desconocidas, según lo que se observaba en la línea era debido a distintos factores, como eran la falta de:

- Capacitación en los trabajadores al realizar los mantenimientos autónomos.
- Refacciones para el mantenimiento preventivo de los equipos.
- Seguimiento de taller de 5´S
- Seguimiento a las fallas de las maquinas
- Retrabajos de material

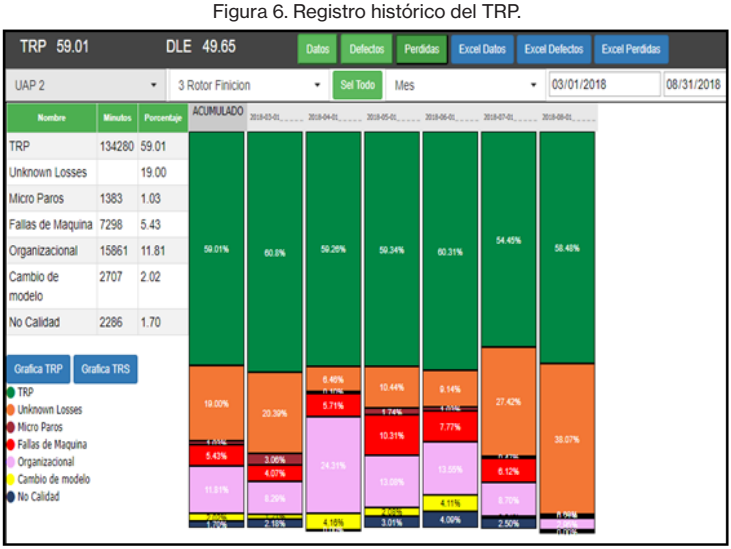
Todo lo anterior dando lugar claramente a significativas pérdidas para la empresa. Por ello para lograr reducir y eliminar dicha problemática, se ejecutó la implementación del ERIM.

5. IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍA ERIM

El desarrollo del proyecto se efectúa de acuerdo con la metodología ERIM, el cual inició con la preparación del personal de producción, donde se les presentó de manera clara y precisa toda la información y procedimientos necesarios que conlleva el desarrollo de dicha metodología, posteriormente, se efectuó una sesión de limpieza profunda basada en los siguientes pasos:

1) Limpieza total de equipo y área de trabajo: basada en la filosofía 5s que confiere a la elaboración de una limpieza minuciosa en cada máquina, tablero eléctrico, así como el organizar u ordenar el área (Figura 7a).
2) Identificación de fuentes contaminantes: en toda la línea se identifican con el fin de eliminar posibles riesgos principalmente para cuidado de personal y medio ambiente (Figura 7b).

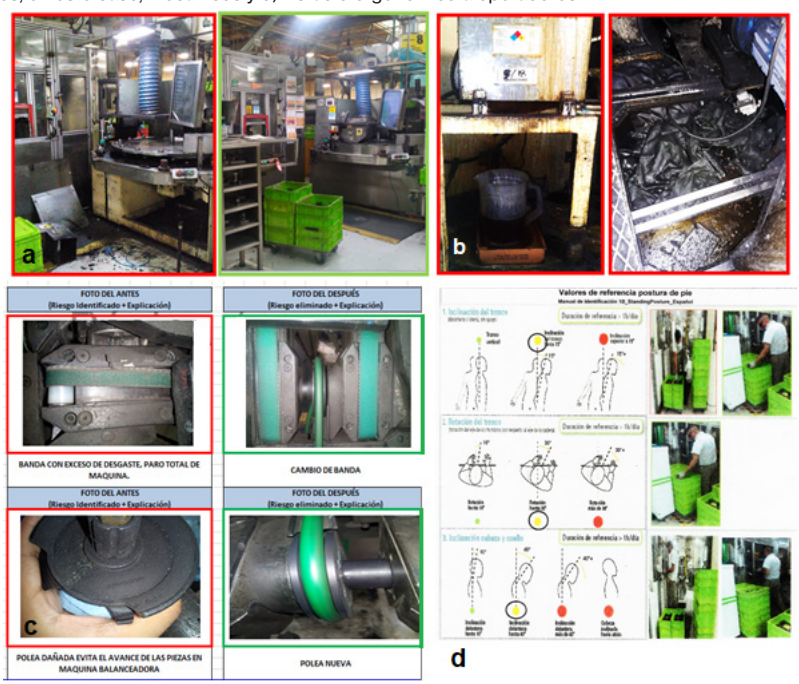
Figura 6. Registro histórico del TRP.



3) Cacería de Riesgos: a través de un procedimiento propio de la empresa, se efectuó un estudio sobre los riesgos encontrados en la línea de producción, los cuales pueden ser de origen químico, eléctrico, mecánico, ergonómico o de seguridad. Dentro de este punto se efectuó un estudio ergonómico para asegurar que las posturas de los operadores fueran las correctas ante las operaciones que realizan para su cuidado personal, y al mismo tiempo, verificar que el operador no realizara movimientos sobrados que le hagan tener pérdidas de tiempo y que afecten la productividad (Figura 7c y d).

4) Lanzamiento y seguimiento de tarjetas rojas en linea de produccion: Para el registro de toda irregularidad que causaba paro o ralentización en máquinas, se utilizaron tatjetas rojas. Estan eran instaladas en un tablero visible, para que los tecnicos de mantenimiento le dieran solucion en el momento. Luego de darle solucion, se realizaban los formatos PDCA/PHVA (Planificar, Hacer, Verificar y Actuar), a través de estos se exponía la causa de raíz de los problemas, las acciones correctivas, los recursos utilizados, la ocurrencia de estas fallas y el aprendizaje que se adquirió al eliminar estas anomalías, para el caso de volver a presentarse dicha situacion, aplicarlo. Estas tarjetas se pueden apreciar en la Figura 8a.

Figura 7. a) Limpieza del área, antes y después, b) Identificación de fuentes contaminantes, c) Ejemplo de riesgos identificados, en este caso, mecánicos y d) Estudio ergonómico a operadores.



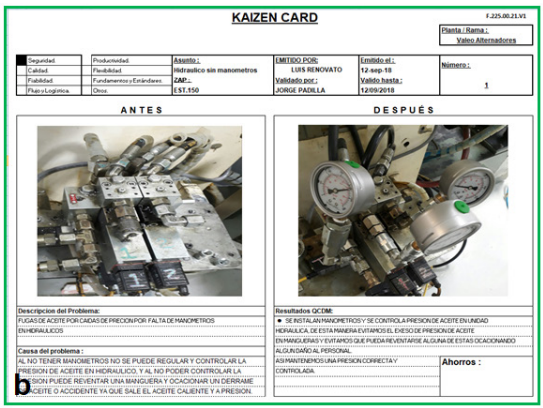
5.1. *KAIZEN CARDS*

Las mejoras en la línea fueron documentadas en formatos denominados *"Kaizen cards"*, las mejoras más trascendentes que se implementaron fueron las siguientes:

- Instalación de manómetros de presión en unidades hidráulicas para evitar caídas de presión y a través de estos controlar y monitorear presiones en niveles adecuados. El formato de Kaizen Card correspondiente a esta mejora se observa en la figura 8b.
- Instalación de gavetas para colocar herramientas de trabajo, ya que no había lugar para situarlas y al encontrarse en el piso podían provocar accidentes.

Figura 8. a) Ejemplo de tarjetas rojas utilizadas y b) Formato de *Kaizen Card* para instalación de un manómetro en una de las líneas hidráulicas.





5.2. CUMPLIMIENTO DE MANTENIMIENTO

Se monitoreó el mantenimiento diariamente en el software Proteus ®, el cual controlaba el registro de cumplimiento de los mantenimientos preventivos y correctivos de los equipos, además de llevar la administración de refacciones críticas, con el fin de asegurar que a los equipos se les realizara los mantenimientos correspondientes por parte del personal técnico en tiempo y forma.

5.3. REVISIÓN SISTEMÁTICA DE DOCUMENTACIÓN DE ÁREA

Se efectuó una revisión sistemática de los documentos de las áreas, en este caso se tuvieron que realizar nuevos instructivos de mantenimiento de 1er y 2do nivel de todas las estaciones de trabajo, se actualizaron los *checklist* de seguridad de los

equipos, así como los instructivos de trabajo, junto con un entrenamiento adecuado a operadores sobre dichos instructivos.

5.4. MEDICIÓN DE TIEMPO CICLO

Se tomaron los tiempos en la línea para verificar si cumplían con el tiempo ciclo de maquina establecido en el software de la empresa, el cual era el tiempo oficial para calcular la capacidad de producción. Este se encontraba en 12.8 segundos, sin embargo, este tiempo resultó obsoleto debido al envejecimiento de algunos equipos (dando un valor mayor). Además, según lo que se observó, se presentó otro problema: el tiempo estaba basado en un solo modelo de rotor, lo cual era perjudicial para la línea, ya que al ejecutar la medición de tiempos ciclos se obtuvo que el tiempo de máquina variaba según el modelo de rotor que circulaba en la línea, por lo tanto, la producción que se demandaba a la línea no era posible, ya que había productos cuya fabricación demandaba un rango mayor de ese tiempo. Como solución a esto se realizó la validación de un nuevo tiempo ciclo; el cuello de botella era la estación de maquinado de colector con 14.47 segundos, valor real obtenido del promedio de la toma de tiempos de los modelos que transitaban en la línea, como se puede apreciar en la Figura 9.

Figura 9. Resultados de las mediciones de tiempo ciclo.

COMPARATIVA DE TOMA DE TIEMPOS POR MODELO EN LINEA FINICION I

		MODELO						PROMEDIO
No. Est.	Operación	EG18	TG15	TG11/TG12	FG18T	FG12 GM	EG15	TOTAL
1	Estación 130 MAQUINADO DE POLO Y ANILLO	13.66	13.60	12.62	13.47	13.68	13.16	13.37
2	Estación 140 INSERCION DE BALERO	8.01	7.07	7.74	8.70	7.05	7.59	7.69
3	Estación 150 BALANCEADORA	13.35	13.33	14.25	13.34	13.50	13.46	13.54
4	Estación 160 MAQUINADO DE COLECTOR	14.81	13.67	13.95	17.00	14.42	13.00	14.47
5	Estación 170 CABINA DE PINTURA	7.87	7.40	7.35	7.72	8.51	8.26	7.85
6	Estación 130-140 MAQUINADO E INSERCION (TIEMPO OPERACION)	13.32	13.36	12.43	13.24	13.12	13.55	13.17
7	Estación 160-170 MAQUINADO DE COLECTOR Y PINTURA (TIEM. OPERACION)	14.46	13.63	13.52	14.42	13.80	13.15	13.83

6. RESULTADOS

Con la implementación de la metodología ERIM se logró optimizar la línea, incrementando la producción de piezas y reduciendo los tiempos desaprovechados y costos de operación, especialmente se logró el objetivo principal que se buscaba alcanzar, el cual era el aumento de TRP en la línea, que de un 59.01% se incrementó a un 74.36% (Figura 10). El compromiso y la participación de todo el personal de la línea de producción permitieron crear un mejor ambiente laboral, se aumentó la fiabilidad de los equipos, hubo mayor apropiación de los trabajadores al dar seguimiento a las fallas

hasta encontrar las causas raíz. El cierre de tarjetas rojas fue también un logro más, pues se realizaron mejoras en el área, que, de no hacerse, pudieron haber provocado algún daño mayor, tanto a los trabajadores como a los equipos. Asimismo, las *Kaizen Card*s permitieron optimizar aún más la línea, facilitando algunas actividades o funciones de los equipos y trabajadores. Actualmente se mantiene un inventario completo, debido a la cotización y compra de las refacciones críticas que faltaban en la línea. Esto podrá evitar posibles pérdidas de tiempo al momento de efectuar los mantenimientos en la línea de rotor acabado I.

Figura 10. a) Antes y b) Después de la implementación de la metodología ERIM.



7. CONCLUSIONES

Con la realización de este proyecto se ha contribuido de manera muy significativa en el incremento de producción en una de las áreas más importantes de la empresa, en el área de rotor acabado I, debido a la participación total de los encargados de esta zona de producción y al seguimiento de dicha técnica se alcanzaron excelentes resultados de reducción de tiempos, costos, mejoras de seguridad y ergonomía, etc. Como se observó, el utilizar este tipo de metodologías, es un proceso muy eficaz para resolver o reducir dificultades en las líneas de producción, pero que requieren de tiempo y esfuerzo, ya que es un seguimiento constante que demanda una formación de valores de disciplina y respeto, esencialmente en los operadores pues son los que están en contacto directo en el proceso del producto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahuja, I., & Kumar, P. (2009). A case study of total productive maintenance implementation at precision tube mills. *Journal Of Quality In Maintenance Engineering*, *15*(3), 241-258. https://doi.org/10.1108/13552510910983198

Chan, F., Lau, H., Ip, R., Chan, H., & Kong, S. (2003). Implementation of total productive maintenance: A case study. *International Journal Of Production Economics*, *95*(1), 71-94. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.10.021

Dounce Villanueva, E., & Dounce Tagle, J. (2016). *La Productividad en el mantenimiento industrial* (Vol. 1, pp. 49-58). CECSA.

M. Cernek, J. Kovacs (2016), " *TPM and the corporate culture from the perspective of excellent companies managers*" [Ponencia], International Scientific Conference Economic and Social Policy Memories, vol. 23, no. 1, pp. 49-58.

CAPÍTULO 5

ROLE OF THE INTERACTION AMYLOSE-NANOCELLULOSE ON THE RHEOLOGICAL PROPERTIES AND MOISTURE SORPTION OF MAIZE STARCH

Data de submissão: 01/09/2026
Data de aceite: 17/09/2026

Ignacia González
School of Nutrition and Dietetics
Universidad de los Andes, Chile

Makarena Jiménez
Biopolymer Research & Engineering Laboratory (BIOPREL)
School of Nutrition and Dietetics
Universidad de los Andes, Chile

Paulo Díaz-Calderón
Biopolymer Research & Engineering Laboratory (BIOPREL)
School of Nutrition and Dietetics
Universidad de los Andes, Chile
Center for Biomedical Research and Innovation (CIIB)
Universidad de los Andes, Chile
https://orcid.org/0000-0002-8375-2210

ABSTRACT: This study investigated the interaction between amylose and two types of nanocellulose, cellulose nanocrystals (CNC) and bacterial cellulose (BC), and its effect on the rheological properties and moisture sorption of maize starch. Native maize starch and waxy-maize starch were used to assess the role of amylose, with nanocellulose incorporated at 0, 2, and 6% (dry basis). Pasting properties were evaluated by Rapid Visco Analysis (RVA), while the evolution of viscoelastic properties during storage was analyzed through dynamic time-sweep rheology. Moisture sorption isotherms were determined by Dynamic Vapor Sorption (DVS) and fitted using the GAB model. In addition, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) was used to evaluate short-range molecular organization. CNC decreased final and setback viscosities, whereas BC increased both parameters, with the effects being more pronounced in maize starch. Both nanocellulose types modified the kinetics of gel formation and generally promoted less elastic or less ordered gel structures, suggesting interference with amylose self-association and self-assembly. CNC and BC also reduced moisture sorption in maize starch, while limited effects were observed in waxy-maize starch. FTIR results further supported changes in short-range organization and water interactions. Overall, the findings suggest that nanocellulose preferentially interacts with amylose, modifying starch molecular organization and consequently its rheological and moisture sorption properties.

KEYWORDS: amylose; starch; cellulose nanocrystals; bacterial cellulose.

ROL DE LA INTERACCION AMILOSA-NANOCELULOSA EN LAS PROPIEDADES REOLOGICAS Y SORCION DE HUMEDAD DE ALMIDON DE MAIZ

RESUMEN: Se estudió la interacción entre la amilosa y dos tipos de nanocelulosa (nanocristales de celulosa CNC y la celulosa bacteriana BC), así como su efecto sobre las propiedades reológicas y sorción de humedad en almidón de maíz. Se utilizaron almidón de maíz nativo y almidón de maíz waxy, incorporando nanocelulosa en concentraciones del 0, 2 y 6 % (base seca). Las propiedades de *pasting* se evaluaron mediante *Rapid-Visco-Analysis* (RVA), mientras que la evolución de las propiedades viscoelásticas durante el almacenamiento se analizó mediante ensayos de reología de barrido de tiempo. Las isotermas de sorción de humedad se determinaron mediante *Dynamic Vapor Sorption* (DVS) y se ajustaron al modelo de GAB. Además, se utilizó espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para evaluar la organización molecular de rango corto. CNC redujo los valores de viscosidad final y *setback* de viscosidad, mientras que BC aumentó ambos parámetros, siendo los efectos más pronunciados en el almidón de maíz. Ambos tipos de nanocelulosa modificaron la cinética de formación del gel y, en general, favorecieron estructuras de gel menos elásticas o menos ordenadas, lo que sugiere una interferencia en la auto-asociación y el auto-ensamblaje de la amilosa. CNC y BC también redujeron la sorción de humedad en el almidón de maíz, mientras que se observaron efectos limitados en el almidón de maíz waxy. Los resultados de FTIR mostraron cambios en la organización de rango corto y en la interacción con el agua. Por lo tanto, los resultados sugieren que la nanocelulosa interactúa preferentemente con la amilosa, modificando la organización molecular del almidón y, en consecuencia, sus propiedades reológicas y de sorción de humedad.
PALABRAS CLAVE: amilosa; almidón; nanocristales de celulosa; celulosa bacteriana.

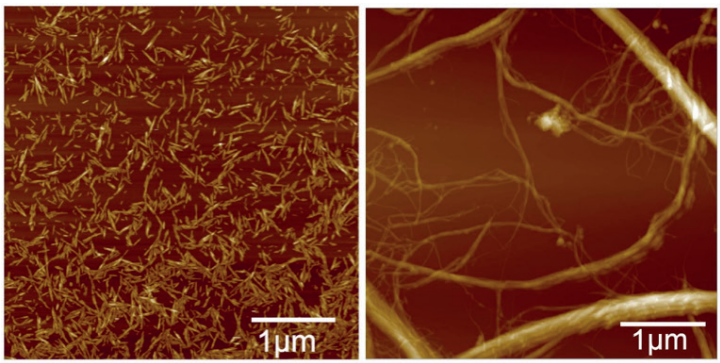
1. INTRODUCTION

Nanocellulose refers to all cellulose-based nanomaterials whose defining characteristic is that at least one of their dimensions (length, width or height) is less than 100 nm. This includes cellulose nanocrystals (CNC), cellulose nanofibers (CNF) and bacterial cellulose (BC). Nanocellulose has been extensively studied in recent decades, primarily due to its potential to reinforce a variety of natural and synthetic materials mechanically (Eichhorn et al, 2022). Furthermore, its plant-based origin makes it interesting from a sustainability perspective, as does its widespread occurrence in nature.

Cellulose nanocrystals (CNCs) are characterized by their rod-like shape, with an average length of 100–200 nm and a width-height of 5–10 nm (Figure 1). They are produced via an acid hydrolysis process, which breaks down the amorphous structures present in elementary cellulose fibers (Fernandes et al, 2023). CNCs also possess a high electronegative charge because of the hydrolysis process. Bacterial cellulose (BC), on the other hand, consists of cellulose fibers produced by the bacterium *Glucoacetobacter*

xylinus. This bacterium synthesizes cellulose fibers ranging in length from micrometers, capable of forming entangled networks (Ullah et al, 2016) (Figure 1).

Figure 1. Images captured by Atomic Force Microscopy (AFM) of the nanocellulose used in this study: cellulose nanocrystals (left) and bacterial cellulose (right). Courtesy of Department of Physics, Universidad de Santiago de Chile.



Nanocellulose has a great potential of applications in different fields such as bioengineering, biomedicine, food, health, cosmetics, pharmaceuticals, water treatment, as a structural reinforcement and in the design of new materials, among others (Eichhorn et al, 2022). A relatively new area of technological interest is the development of bio-based materials to be used in the design of multifunctional biocomposites. Although various natural polymers have been tested, starch is one of the most promising alternatives due to its wide availability and low cost, but also for biodegradability and sustainability reasons. Currently, starch is being considering rather than a mere food ingredient. In turn, starch has been proposed for using in different technological applications such as tissue engineering, green packaging, spinning products and in flexible electronic devices, to name a few (Wang et al, 2023).

Using starch in high-tech applications requires a precise understanding of how its structuring polymers (amylose and amylopectin) respond to different processing conditions, as well as how they behave during the storage. Therefore, characterizing the processes of gelatinization and retrogradation is essential for predicting starch performance in various technological applications. In this regard, amylose behavior is significant as it determines the formation of organized structures through self-association and self-assembly mechanisms. Therefore, understanding the interaction amylose-nanocellulose and how the presence of nanocellulose would modify the self-association and self-assembly processes of amylose during the early stages of retrogradation (also known as short-range retrogradation) is important for the rational design of multifunctional starch-nanocellulose composites.

This study aimed to conduct a preliminary analysis of the interaction between two types of nanocellulose (CNC and BC) and amylose in maize starch, and to examine how this interaction affects the rheological properties and moisture sorption of maize starch. A sample of waxy-maize starch was used as a control, and short-range organization analysis carried out by infrared spectroscopy was also tested.

2. PREPARATION OF STARCH-NANOCELLULOSE SUSPENSIONS

Native waxy-maize and maize starch were purchased in powder form from Sigma Aldrich (Germany). Cellulose nanocrystals (CNC) from cotton cellulose pulp were purchased in freeze-dried form from The Process Development Center of the University of Maine (USA). Dried sheets of bacterial cellulose (BC) were kindly provided by Vuelo Pharma (Brazil). AFM images of nanocellulose used in this study are shown in Figure 1. Nanocellulose suspensions were prepared at concentrations of 0%, 2% and 6% w/w (dry basis) in according with Equation 1. Starch was weighed considering having a final starch concentration of 8% w/v.

Equation 1

$$Nanocellulose\ concentration\ \left(\%, \frac{w}{v}\right) = \left(\frac{Nanocellulose_{weight}}{Nanocellulose_{weight} + Starch_{weight}}\right) * 100$$

Well-defined amounts of CNC and BC were weighed and processed before mixing with starch. BC was homogenized using a high-powered kitchen blender for 20 min and vacuum filtered. Filtered BC was used to obtain a hydrated paste with a well-defined concentration. CNC was added directly to water and stirred until complete dispersion. Once CNC and BC were completely dispersed in water, they were sonicated (5 min, 1200 W) at room temperature to promote complete dispersion of the particles. Once the nanocellulose was dispersed the well-defined amount of starch was added.

3. RHEOLOGICAL PROPERTIES

Pasting properties of starch-nanocellulose pastes were evaluated by Rapid-Visco-Analysis (RVA 4500, Perten, Australia) following the protocol described by Díaz-Calderón et al (2018). Briefly, 2 g of native starch was weighed into aluminum canisters and 25 mL of suspension with different CNC or BC concentrations was transferred. Paste profiles were obtained as follow: holding at 25°C for 2 min, heating between 25-95°C at 13.5°C/min, holding at 95°C for 5 min, cooling to 25°C at 13.5°C/min and holding

at 25°C for 5 min. The analysis was carried out under constant stirring (160 rpm). As this work focuses on the interaction between amylose and nanocellulose, this section will only analyze the final viscosity (FV) and setback viscosity (SV) as pasting parameters.

Our results showed large differences on the pasting profiles between starches, but also within the same starch with different levels of CNC or BC (Figure 2). This is reflected in the pasting properties shown in Table 1, which highlight the differences in pasting parameters between maize starch and waxy-maize starch. Our results show that CNC reduces the FV and SV values of wheat and waxy-maize starches, while BC significantly increases them. Literature typically links FV and SV parameters to the ability of starch to reassociate during cooling/storage in an RVA experiment (Balet et al, 2019). Thus, a higher FV value indicates a greater capacity for reassociation. Furthermore, SV has been described as an indicator of retrogradation in starches. However, relatively recent studies on starch-bacterial cellulose blends have shown that assessing the relative increase in viscosity during the cooling stage does not necessarily mean that higher viscosity indicates greater starch association (Díaz-Calderón et al, 2022; Criquet et al, 2026). In this study, the relative increase was found to be around 1.85 for wheat starch mixtures with CNC-BC and 2.05 for waxy starch mixtures with CNC-BC. Therefore, complementary analysis is required to unravel the interaction amylose-nanocellulose.

Figure 2. Pasting profiles of maize starch and waxy-maize starch in presence of cellulose nanocrystals (CNC) or bacterial cellulose (BC). a) maize starch and CNC, b) maize starch and BC, c) waxy-maize starch and CNC, and d) waxy-maize and BC. Dotted lines represent the processing temperature.

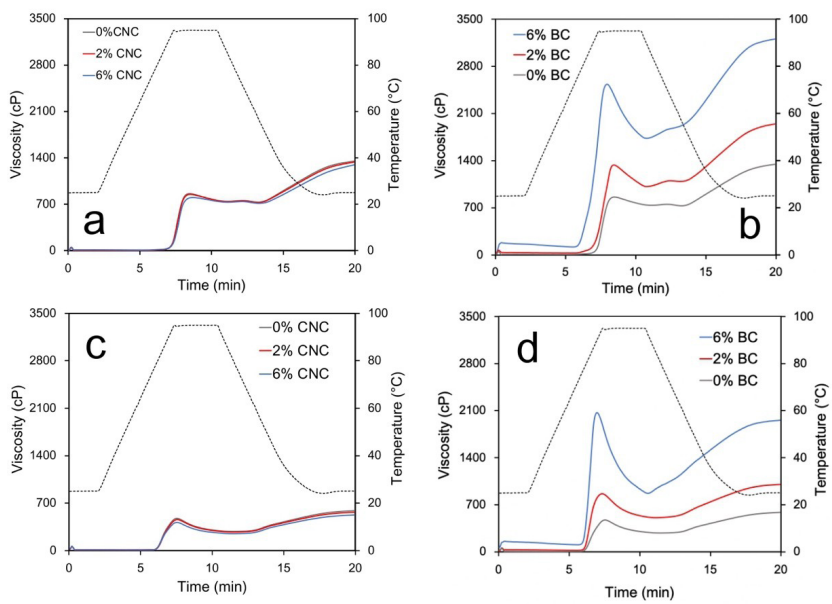


Table 1. Pasting parameters of starch-nanocellulose pastes from the testing by RVA. FV: final viscosity; BV: setback viscosity. Different letters within the same column mean significant differences ($p<0.05$, $n\geq3$).

Nanocellulose	Nanocellulose concentration (%, db)	Maize		Waxy Maize	
		FV (cP)	SV (cP)	FV (cP)	SV (cP)
CNC	0	1348[a]	617[a]	587[a]	307[a]
	2	1334[a]	610[a]	566[b]	292[a]
	6	1293[b]	582[b]	525[c]	276[b]
BC	2	1994[c]	928[c]	1003[d]	495[c]
	6	3203[d]	1473[d]	1857[e]	923[d]

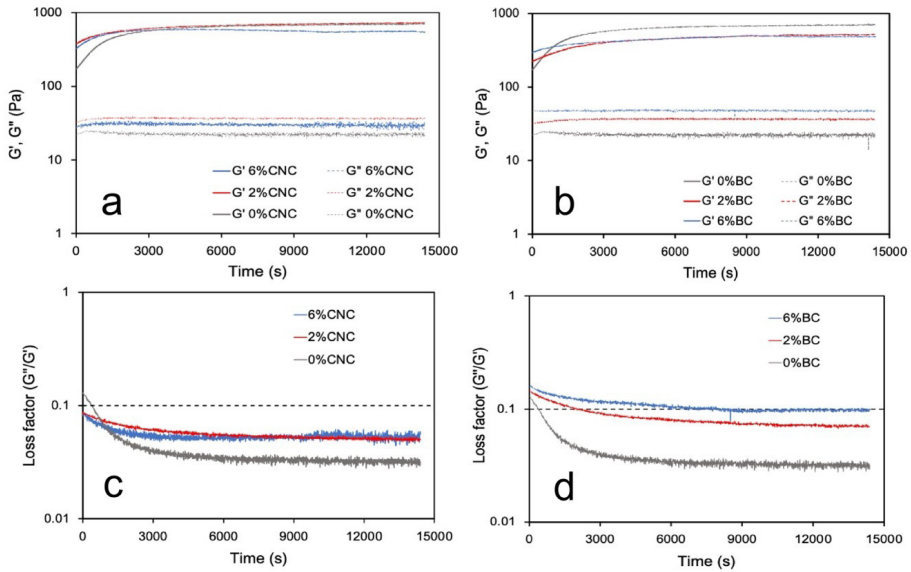
An analysis of dynamic time sweep was performed in a rheometer to assess the change in viscoelasticity over time. A sample was taken from the canister after the RVA test and immediately loaded into a rheometer (HR-2, TA Instruments, USA) set at 25°C. A parallel flat stainless-steel geometry of 50 mm diameter was used, and a 1000 µm gap was selected for testing. G′, G″ and loss factor were determined at constant strain and frequency (0.05% and 10 rad/s respectively) over a period of 4 h at 25°C. Results are presented in Figure 3 and 4.

Following the same trend previously observed in RVA results, changes in G' and G'' over time are quite different between starches and within the same starch with different levels of CNC or BC (Figures 3 and 4).

Our results showed that both starches exhibited "gel-like" behavior in the presence of CNC, with G' > G". However, the presence of CNC accelerated the rate of change in G' in maize starch compared to the control sample (without nanocellulose), as evidenced by the fact that the G' plateau was reached more quickly. Nevertheless, the sample containing 6% CNC exhibited a lower G' value at the end of the analysis (Figure 3a). Furthermore, CNC increased the G'' value throughout the entire time window studied. In the case of waxy-maize starch (Figure 3b), only the sample containing 6% CNC exhibited an increase in G', a trend also observed in the G'' kinetics. Interesting is the behavior exhibited by the loss factor (G''/G') in starches in the presence of CNC. Our results showed that, in maize starch, the presence of CNC tends to increase the loss factor value, regardless of its concentration (Figure 3c). While all maize-CNC gels can be classified as strong gels according to Ikeda et al (2001) classification (loss factor > 0.1), gels containing CNC tend to be less elastic, suggesting different, possibly less ordered, structural organization. Conversely, the presence of CNC in waxy maize starch does not alter the behavior of the loss factor, which tends to remain at around 0.1 in all cases (Figure 3d). This suggests that CNC interacts preferentially with amylose rather than amylopectin in starches, presumably

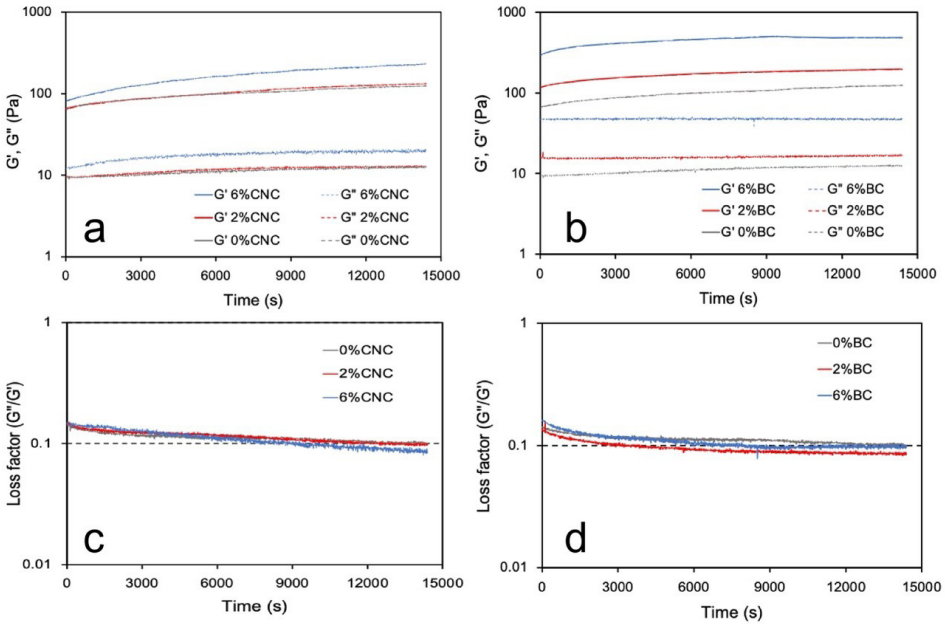
altering the mechanism of self-association of the amylose resulting in less ordered organization and less elastic gels.

Figure 3. Dynamic time sweep of maize starch in presence of cellulose nanocrystals (CNC) or bacterial cellulose (BC). Maize starch and CNC (a and c). Maize starch and BC (b and d). All analysis performed at 25°C, strain of 0.05% and frequency of 10 rad/s.



In the case of BC, the kinetics of the change in G' over time exhibit a distinct pattern. For maize starch, the presence of BC was found to alter the kinetics, resulting in lower G' values compared to the control sample after four hours of analysis (Figure 4a). G", on the other hand, increased proportionally to the BC concentration throughout the entire analysis period. In waxy maize starch, the presence of BC produced a significant increase in the rate of change of G' and G" proportional to the BC concentration (Figure 4b). Analysis of the loss factor (G"/G') showed that BC significantly increased its value, resulting in less elastic gels. In the case of 6% BC, this favored the formation of a weak gel (loss factor >0.1). As in the case of CNC, the presence of BC did not significantly alter the loss factor parameter value in waxy maize starch, which was around 0.1 in all cases. These results are consistent with previous observations in the starch-CNC system and support the idea that, regardless of size and charge, nanocellulose tends to interact preferentially with amylose. This would interfere with the self-association mechanism and favors the formation of weak or less ordered gels.

Figure 4. Dynamic time sweep of waxy-maize starch in presence of cellulose nanocrystals (CNC) or bacterial cellulose (BC). Waxy-maize starch and CNC (a and c). Waxy-maize starch and BC (b and d). All analysis performed at 25°C, strain of 0.05% and frequency of 10 rad/s.



A recent study by Díaz-Calderón et al. (2026) demonstrated how CNC and BC modify the rheological properties of wheat starch, showing that CNC promotes the formation of strong gels by forming aggregates with starch. In contrast, BC promotes the formation of weak gels, as the organization of the gel's structure is characterized by structural domains rich in starch and others rich in BC. The complex structure of BC does not allow for close interaction with other materials (Quero et al., 2015; Díaz-Calderón et al., 2018). Interaction between amylose and biopolymers resulting in less elastic structures due to disruption of amylose helical formation has been previously reported in the literature (Montes et al., 2022; Liu et al., 2021).

4. MOISTURE SORPTION ISOTHERMS

Figure 5. Sorption isotherms of maize starch (a and b) and waxy-maize starch (c and d) in presence of cellulose nanocrystals (CNC) and bacterial cellulose (BC) at different concentrations (0 to 6% db), at 20°C. Continuous lines represent the GAB fit of experimental data.

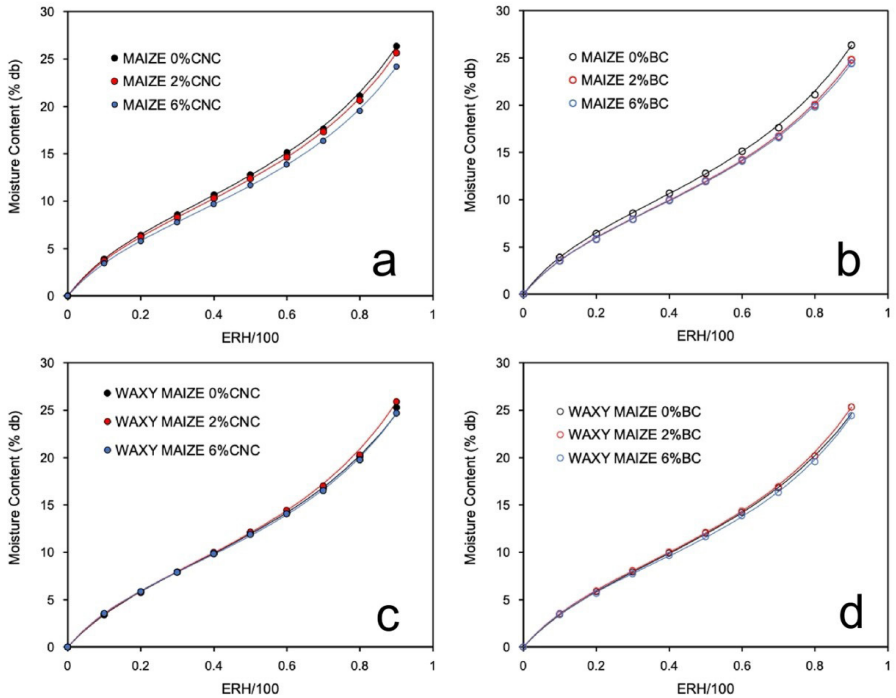


Table 2. Sorption parameters obtained from the GAB fitting.

Starch	Nanocellulose	Concentration (%, db)	m_0 (%db)	C-GAB (dimensionless)	K-GAB (dimensionless)	MSE (%)
Maize	CNC	0	10.39	7.05	0.71	0.64
		2	10.09	6.83	0.71	0.33
		6	9.69	6.52	0.70	0.48
	BC	2	9.91	6.63	0.70	0.69
		6	9.88	6.62	0.70	0.53
Waxy Maize	CNC	0	10.26	6.02	0.69	0.45
		2	9.96	6.17	0.72	1.00
		6	9.55	6.86	0.71	0.66
	BC	2	10.00	6.42	0.71	0.57
		6	9.45	6.67	0.71	0.62

An interesting approach for testing structural changes in biopolymers is analyzing the interaction water-matrix. Any change in the association or assembly of the polymer

chains could provoke changes in the moisture sorption behavior. Hence, moisture sorption isotherms of blends starch-nanocellulose were obtained by Dynamic Vapor Sorption (Intrinsic DVS, Surface Measurements Systems, USA). Approximately 20 mg of sample was loaded into the instrument and programmed cycle of equilibrating relative humidities went from 0 to 90%, with 10% increments at constant temperature (25°C). Helped by a microbalance, the samples were at equilibrium when the slope of the change in mass with time (dm/dt) was set to be less than 0.001 mass%/min. The moisture content of the equilibrated sample was expressed in dry-mass basis. The mass of the dry sample was obtained from the first step of the protocol in which the sample was held at an RH of 0% during at least 12 h at 25°C. Once the isotherm is obtained, it was fit by the well-known GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) model.

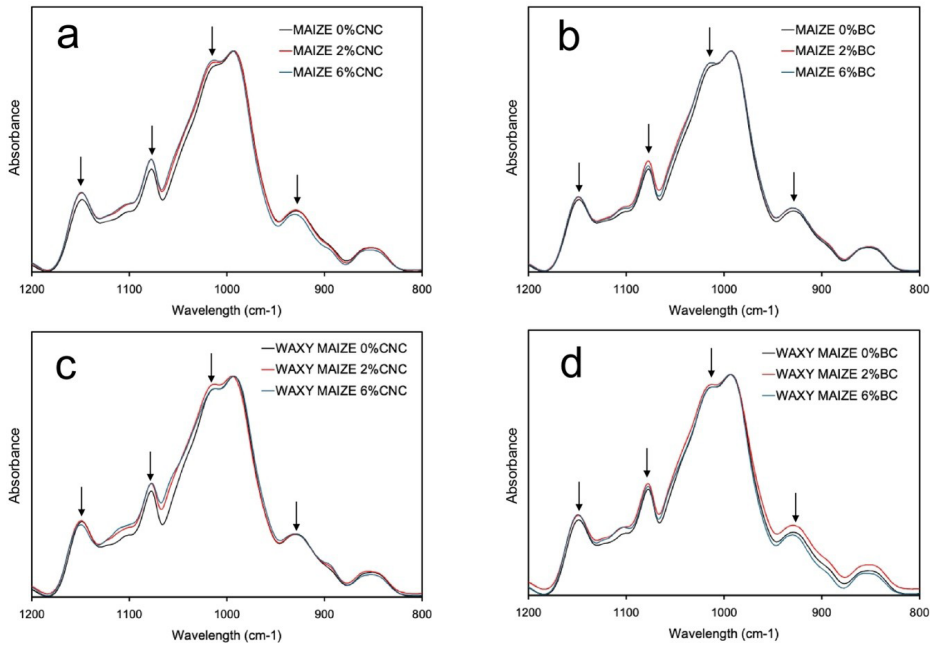
Sorption isotherms of maize starch and waxy-maize starch in presence of CNC and BC are shown in Figure 5. Our results clearly demonstrate that the presence of nanocellulose alters moisture sorption, with this effect depending on the type of starch. Thus, both CNC and BC reduce moisture sorption in maize starch (Figures 5a and 5b). This behavior could be explained by the interaction between amylose and nanocellulose, which probably occurs at the polar sites that were previously available for water. This suggests that changes occur in the self-association and self-assembly of amylose in the presence of nanocellulose during starch retrogradation. This behavior is reflected in the GAB parameters, which show a reduction in moisture content (m_0) and sorption energy (C-GAB parameter) in samples containing nanocellulose (Table 2). Therefore, CNC and BC would occupy polar sites, reducing their availability for water molecules and resulting in weaker binding of water molecules to polar sites. In the case of waxy-maize starch, the presence of nanocellulose does not affect moisture sorption (Figure 5, c and d). This finding supports the idea that nanocellulose primarily interacts with amylose, which in turn interacts with water. Additionally, the C-GAB tends to increase with increasing nanocellulose concentration (Table 2), suggesting that the absence of amylose determines different amylopectin-nanocellulose assemblies.

The literature reports that nanocellulose generally reduces the sorption of moisture in starch matrices, whether in the form of CNC or cellulose nanofibers. This effect has been attributed to greater tortuosity of the water diffusion path, increased crystallinity of the matrix, and interactions between starch and nanocellulose (Popescu et al, 2017; Lin Ong et al, 2020; Lai et al, 2023). Some studies have also reported decreases in GAB model parameters, particularly m_0, although the effect on C-GAB may vary depending on the type of starch and nanocellulose used (Balakrishnan et al, 2018; García-Guzmán

et al, 2024). Overall, the results suggest that nanocellulose modifies the structure and the interactions between water and starch, thereby reducing the material's moisture absorption capacity.

5. SHORT-RANGE ORGANIZATION BY FOURIER TRANSFORM INFRARED SPECTROSCOPY (FTIR)

Figure 6. FTIR patterns of maize starch (a and b) and waxy-maize starch (c and d) in presence of cellulose nanocrystals (CNC) and bacterial cellulose (BC) at different concentrations (0 to 6% db Arrows indicate peaks located at 1150cm-1, 1080cm-1, 1022cm-1 y 930cm-1.



To understand the potential role of molecular arrangements on some macrostructural features an analysis of the short-range organization can be carried out. The short-range organization of blends starch-nanocellulose was studied by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Spectra were recorded using a Spectrum Two spectrometer (Perkin Elmer, USA) equipped with an attenuated total reflectance (ATR) accessory. The averaged spectra were obtained over a wavenumber range of 4000 to 400 cm^{-1} acquiring 64 scans at a spectral resolution of 4 cm^{-1}. All measurements were carried out in triplicate. The spectra obtained were processed using Spectrum 10TM software including baseline correction and normalization of the relative absorbance.

Figure 6 shows the FTIR spectra of maize starch and waxy maize starch mixtures with different concentrations of CNC and BC. Peaks at 1150 cm^{-1} (ordered structures), 1080 cm^{-1} (crystallinity), 1022 cm^{-1} (amorphous structure) and 930 cm^{-1} (water interaction) are of interest when evaluating the short-range organization of the starch (Warren et al., 2016; Falade et al., 2022; Lu et al., 2021). Our results suggest that the presence of nanocellulose alters the short-range organization of the starch. In maize starch, CNC increases the intensity of the peak associated with amorphism (1022 cm^{-1}), suggesting it promotes changes to the starch›s self-association and self-assembly mechanisms during storage. This higher degree of starch amorphism could explain the less elastic gel state caused by CNC, which was previously observed in the time-sweep analysis (Figure 3). Furthermore, the peak associated with water interaction (930 cm^{-1}) shows that the peak intensity is slightly lower in samples containing nanocellulose. This is consistent with the behavior of moisture sorption (Figure 2a) and the GAB fit parameters (Table 2). These results are also consistent with the amylose–CNC interaction effect described in the literature. This effect would explain the reduction in sorption (the CNC would interact with the amylose at polar sites where water previously interacted) and the modification of maize starch rheology. Conversely, the increase in peaks associated with organization or crystallinity (1150 cm^{-1} and 1080 cm^{-1}) is interesting; however, this may be more closely related to nanocellulose›s contribution to crystallinity/organization than to an effect on the starch structure. In the case of maize starch-BC, the presence of BC results in increased amorphism (1022 cm^{-1}), a slight increase in the water interaction peak (930 cm^{-1}), and minor increases in the crystallinity/organization peaks (1150 cm^{-1} and 1080 cm^{-1}). These results suggest that the mechanisms of amylose–BC interaction differ from those previously observed with CNC. BC would promote short-range interactions with water, but these would not be sufficient to alter moisture sorption on a macro scale. Regarding waxy-maize starch, only 2% of CNC or BC slightly increased the amorphism of starch (Figure 6c). The presence of CNC didn't alter the interaction peak with water (930 cm-1), which is consistent with the sorption behavior, whereas BC changed the water peak intensity following a similar trend presented by the sorption data (Figure 5d). Also, nanocellulose slightly increased the peaks related with organization/crystallinity. Finally, FTIR data supports the idea that nanocellulose interacts preferably with amylose, suggesting that interactions taking place at the molecular level have direct effect on macrostructural properties. Thus, our results showed that the interaction between amylose and nanocellulose is a key mechanism that changes the molecular organization of maize starch, and therefore its rheological and moisture sorption properties.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the financial support received from Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico FONDECYT (Grant N°1250960) ANID-Chile.

REFERENCES

Balet S, Guelpa A, Fox G, Manley M. “Rapid Visco Analyser (RVA) as a Tool for Measuring Starch-Related Physiochemical Properties in Cereals: a Review” Food Analytical Methods 12 (2019): 2344-2360.

Balakrishnan P, Gopi S, Sreekala M, Thomas S. “UV resistant transparent bionanocomposite films based on potato starch/cellulose for sustainable packaging”. Starch/Stärke 70 (2018).

Criquet J, Caballero L, Melo F, Enrione J, Díaz-Calderón P. “Influence of nanocellulose with different particle size on pasting and rheological properties of wheat starch. International Journal of Biological Macromolecules 350 (2026): 150972.

Díaz-Calderón P, MacNaughtan B, Hill S, Foster T, Enrione J, Mitchell J. “Changes in gelatinisation and pasting properties of various starches (wheat, maize and waxy maize) by the addition of bacterial cellulose fibrils”. Food Hydrocolloids 80 (2018): 274-280.

Díaz-Calderón P, Simone S, Tyler A.I.I., Enrione J, Foster T. “A structural study of the self-association of different starches in presence of bacterial cellulose fibrils”. Carbohydrate Polymers 288 (2022): 119361.

Eichhorn S.J, Etale A., Wang J., Berglund L.A., Li Y., Cai Y., Chen C., Cranston E.D., Johns M.A., Fang Z., Li G., Hu L., Khandelwal M., Lee K.Y., Oksman K., Pinitsoontorn S., Quero F., Sebastian A., Titirici M.M., Xu Z., Vignolini S., Frka-Petesic B. “Current international research into cellulose as a functional nanomaterial for advanced applications”, Journal of Materials Science 57 (2022): 5697–5767.

Falade K.O., Ayetigbo O.E. “Influence of physical and chemical modifications on granule size frequency distribution, fourier transform infrared (FTIR) spectra and adsorption isotherms of starch from four yam (Dioscorea spp.) cultivars”. Journal of Food Science and Technology 59 (2022): 1865-1877.

Fernandes A., Cruz-Lopes L., Esteves B., Evtuguin D., Nanotechnology applied to cellulosic materials, Materials 16 (2023): 3104.

García-Guzmán L, Velásquez G, Velásquez-Martínez I, Alpizar-Reyes E, Castaño J, Guadarrama-Lezama A. “Thermodynamics of water vapor sorption of fiber-reinforced starch films” Cellulose 31 (2024): 3681-3697.

Ikeda S, Nishinari K. ““Weak Gel” - Type Rheological Properties of Aqueous Dispersions of Nonaggregated K -Carrageenan Helices”. Journal of Agricultural and Food Chemistry 49 (2001): 4436-4441.

Montes L, Rosell C, Moreira R. “Rheological Properties of Corn Starch Gels With the Addition of Hydroxypropyl Methylcellulose of Different Viscosities”. Frontiers in Nutrition 9 (2022):

Lai D., Osman A, Adnan S, Ibrahim I, Sandu A, Rahim S, Vizureanu P. “The role of natural hybrid nanobentonite/nanocellulose in enhancing the water resistance properties of the biodegradable thermoplastic starch”. E-Polymers 23 (2023):

Lin Ong H, Villagracia A, Owi W, Sam S, Akil H. “Revealing the Water Resistance, Thermal and Biodegradation Properties of Citrus aurantifolia Crosslinked Tapioca Starch/Nanocellulose Bionanocomposites”. Journal of Polymers and the Environment 28 (2020): 3256-3269.

Liu Y, Chen Q, Fang F, Liu J, Wang Z, Chen H, Zhang F. “The influence of konjac glucomannan on the physicochemical and rheological properties and microstructure of canna starch”. Foods 10 (2021): 1-12.

Lu H., Ma R., Chang R., Tian Y. “Evaluation of starch retrogradation by infrared spectroscopy”. Food Hydrocolloids 120 (2021): 106975.

Quero F, Coveney A, Lewandowska A.E., Richardson R.M., Díaz-Calderón P, Lee K-Y, Eichhorn S.J., Alam M.A., Enrione J. “Stress Transfer Quantification in Gelatin-Matrix Natural Composites with Tunable Optical Properties”. Biomacromolecules 16 (2015): 1784-1793.

Popescu M, Dogaru B, Popescu C. “The influence of cellulose nanocrystals content on the water sorption properties of bio-based composite films”. Materials and Design 132 (2017): 170-177.

Ullah H., Santos H.A., Khan T., “Applications of bacterial cellulose in food, cosmetics and drug delivery”. Cellulose 23 (2016) 2291–2314.

Wang S., Zhang P., Li Y., Li J., Li X., Yang J., Ji M., Li F, Zhang C. “Recent advances and future challenges of the starch-based bio-composites for engineering applications”. Carbohydrate Polymers 307 (2023): 120627.

Warren F., Gidley M.J., Flanagan B.M. “Infrared spectroscopy as a tool to characterise starch ordered structure – a joint FTIR-ATR, NMR, XRD and DSC study”. Carbohydrate Polymers 139 (2016): 35-42.

CAPÍTULO 6

CONSTRUCCIÓN DEL MARCO TEÓRICO EN PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA: REVISIÓN NARRATIVA Y ORIENTACIONES DIDÁCTICAS PARA ESTUDIANTES DE LICENCIATURA

Data de submissão: 07/09/2026
Data de aceite: 21/09/2026

Javier Montoya Ponce
Departamento de Ingenierías
Tecnológico Nacional de México
Cd. Jiménez
Jiménez, Chihuahua, México
https://orcid.org/0000-0002-9857-7961

Bertha Ivonne Sánchez Luján
Departamento de Ciencias Básicas
Tecnológico Nacional de México
Cd. Jiménez
Jiménez, Chihuahua, México
https://orcid.org/0000-0002-3595-8281

María Teresa Martinez Acosta
Departamento de Ciencias Básicas
Tecnológico Nacional de México
Cd. Jiménez
Jiménez, Chihuahua, México
https://orcid.org/0000-0001-8934-4843

María Guadalupe Amado Moreno
Departamento de Ciencias Básicas
Tecnológico Nacional de México- Mexicali
Mexicali, Baja California, México
https://orcid.org/0000-0001-6363-5888

RESUMEN: Construir un marco teórico no consiste únicamente en localizar información y reunir definiciones. La dificultad aparece cuando el estudiante debe decidir qué referentes permiten delimitar el problema, cómo se relacionan y de qué manera sustentan el método y la interpretación. Este artículo analiza las funciones, los componentes y el proceso de construcción del marco teórico en proyectos de licenciatura en ingeniería, con el propósito de formular orientaciones didácticas para las asignaturas de investigación. Para ello, se realizó una revisión narrativa integrativa de aportaciones conceptuales, metodológicas y educativas, con atención a la evidencia latinoamericana y a la literatura reciente sobre inteligencia artificial generativa. El análisis diferencia teoría, marco teórico, marco conceptual, antecedentes, contexto y referentes técnicos o normativos, y examina su relación con preguntas, objetivos, hipótesis, supuestos, variables, parámetros, categorías y requisitos de diseño. Sobre esta base, se propone una ruta didáctica de cinco fases: delimitación, preparación de la búsqueda, evaluación documental, síntesis crítica y revisión de coherencia. Las matrices de análisis y el protocolo para el uso ético y verificable de inteligencia artificial acompañan esta ruta, cuyo sentido es orientar al estudiante para que construya una argumentación sustentada, en lugar de acumular definiciones, resúmenes o citas.

PALABRAS CLAVE: marco teórico; formación investigativa; educación en ingeniería; escritura académica; inteligencia artificial generativa.

CONSTRUCTING THE THEORETICAL FRAMEWORK IN ENGINEERING RESEARCH PROJECTS: AN NARRATIVE REVIEW AND TEACHING GUIDELINES FOR UNDERGRADUATE STUDENTS

ABSTRACT: Constructing a theoretical framework involves more than locating information and compiling definitions. The difficulty emerges when students must decide which references can delimit the research problem, how these sources relate to one another, and how they support methodological choices and interpretation. This article examines the functions, components, and construction of theoretical frameworks in undergraduate engineering research projects to develop teaching guidelines for research-methods courses. A narrative integrative review was conducted of conceptual, methodological, and educational contributions, with particular attention to Latin American evidence and recent literature on generative artificial intelligence. The analysis distinguishes among theory, theoretical frameworks, conceptual frameworks, background studies, contextual information, and technical or regulatory references. It also examines how these components relate to research questions, objectives, hypotheses, assumptions, variables, parameters, analytical categories, and design requirements. On this basis, a five-phase teaching pathway is proposed: problem delimitation, search preparation, source evaluation, critical synthesis, and coherence review. Documentary-analysis matrices and a protocol for the ethical and verifiable use of generative artificial intelligence support this pathway, which is intended to help students construct evidence-based arguments rather than accumulate definitions, summaries, or citations.
KEYWORDS: theoretical framework; research education; engineering education; academic writing; generative artificial intelligence.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción del marco teórico suele ser una de las tareas más complejas en la formación inicial para la investigación. Un estudiante puede localizar información y reunir definiciones relacionadas con un tema sin comprender todavía qué función cumple cada referente dentro de su proyecto. La dificultad aparece cuando debe decidir qué fuentes son pertinentes, cómo se relacionan entre sí y de qué manera contribuyen a delimitar el problema, fundamentar el método e interpretar los resultados. Por esta razón, la extensión del documento o la cantidad de citas incorporadas dicen poco, por sí mismas, acerca de la solidez de su fundamentación.

Gómez Mendoza y Alzate Piedrahita (2017) sitúan la construcción del marco teórico en un proceso de elaboración conceptual, argumentación y retórica vinculado con la pregunta y los objetivos de investigación. Esta perspectiva desplaza la atención desde la recopilación de información hacia las decisiones que organizan el razonamiento. En el ámbito didáctico, Campos Hernández (2021) plantea que aprender a investigar supone articular conocimientos epistemológicos, teóricos, metodológicos y discursivos mediante

actividades situadas, reflexivas y acompañadas. Entregar al estudiante un índice o solicitarle un número mínimo de referencias puede ofrecerle una estructura inicial, pero no le enseña a establecer las relaciones que dan sentido al marco teórico.

En los proyectos de ingeniería, estas relaciones adquieren una complejidad particular. Una investigación puede requerir teorías científicas, modelos matemáticos, normas técnicas, parámetros de diseño, simulaciones, evidencia experimental y condiciones operativas. Aunque todos estos referentes pueden ser necesarios, no cumplen la misma función: el modelo matemático representa relaciones entre variables; la norma establece criterios de cumplimiento; un antecedente experimental proporciona parámetros de comparación; y la teoría permite explicar el comportamiento del fenómeno. Cuando se incorporan sin distinguir estas funciones, el documento puede aumentar su extensión sin que avance la comprensión del problema.

Esta dificultad sugiere que la formación investigativa no tendría que quedar confinada a los cursos generales de metodología. Estrada Molina et al. (2022) analizaron una propuesta orientada al desarrollo de habilidades investigativas dentro de una asignatura de gestión de software, mediante un estudio de caso con 28 estudiantes de Ingeniería en Ciencias Informáticas. Por su carácter institucional, los resultados no pueden generalizarse al conjunto de las carreras o universidades latinoamericanas. La experiencia sí permite reconocer una posibilidad formativa relevante: trabajar la investigación en relación con los problemas, prácticas y proyectos propios de la ingeniería, en lugar de presentarla como un procedimiento separado de la formación disciplinar.

A esta dificultad se incorpora ahora el uso de herramientas de inteligencia artificial generativa en la búsqueda, la lectura y la escritura académica. Su utilidad no puede valorarse al margen de la tarea concreta ni de la supervisión ejercida por quien investiga. Pueden ayudar a explorar descriptores, organizar información, comparar textos o revisar la expresión lingüística; también pueden producir afirmaciones sin respaldo, referencias inexistentes o síntesis que omiten condiciones relevantes. Miao y Holmes (2023) sitúan la agencia humana, la privacidad, la transparencia y la evaluación crítica entre las condiciones que deben orientar su uso en educación e investigación. En la construcción del marco teórico, estas condiciones se traducen en una responsabilidad verificable: comprobar la autoría, el título, el DOI, la revista y el contenido de cada documento, pero también examinar si la fuente respalda realmente la afirmación para la cual se utiliza.

La misma exigencia de trazabilidad debe aplicarse a este artículo. Jaakkola (2020) advierte que un trabajo conceptual necesita explicar cómo selecciona los conceptos y las teorías, qué función les asigna y mediante qué lógica organiza su argumento. Barry et

al. (2022) señalan, además, que denominar un texto como revisión no garantiza su rigor cuando permanecen implícitos el propósito, el procedimiento y los criterios de síntesis. Estas observaciones obligan a que la orientación didáctica propuesta no solo recomiende transparencia a los estudiantes, sino que muestre cómo fueron seleccionados, relacionados y utilizados los referentes que la sustentan.

A partir de este problema se plantea la siguiente pregunta: ¿qué fundamentos conceptuales, documentales, argumentativos y éticos permiten orientar la construcción de un marco teórico coherente en proyectos de investigación de estudiantes de licenciatura en ingeniería? Para responderla, se analizan las funciones, los componentes y el proceso de construcción del marco teórico mediante una revisión narrativa integrativa de literatura metodológica y educativa. El propósito es sustentar una ruta didáctica que articule la delimitación del problema, la búsqueda y evaluación de fuentes, la síntesis crítica, las decisiones metodológicas y el uso ético y verificable de inteligencia artificial.

La propuesta diferencia los antecedentes, el contexto, las bases teóricas y conceptuales, los modelos, las normas y los parámetros técnicos según la función que cumplen dentro de un proyecto. Asimismo, incorpora matrices, ejemplos y criterios de autoevaluación que permiten hacer visibles las decisiones tomadas durante el proceso. Está dirigida principalmente a estudiantes y docentes de asignaturas de investigación en ingeniería; no obstante, sus componentes pueden adaptarse a otros campos profesionales de licenciatura, siempre que se consideren sus formas particulares de producir y validar conocimiento.

2. PROCEDIMIENTO DE REVISIÓN DOCUMENTAL

2.1. TIPO Y ORIENTACIÓN DE LA REVISIÓN

Se realizó una revisión narrativa integrativa orientada a examinar las funciones, los componentes y los procesos implicados en la construcción del marco teórico en proyectos de investigación de licenciatura, con énfasis en la formación de estudiantes de ingeniería. Esta modalidad se consideró congruente con el propósito del artículo porque no se buscaba evaluar la eficacia de una intervención ni sintetizar resultados estadísticos, sino relacionar aportaciones conceptuales, metodológicas, didácticas y éticas procedentes de distintas tradiciones de investigación.

La elección también respondió a la naturaleza de la contribución propuesta. Jaakkola (2020) señala que un artículo conceptual debe hacer explícita la selección de los conceptos, la función asignada a las teorías y la lógica mediante la cual se construye el argumento. De manera complementaria, Barry et al. (2022) sostienen que una síntesis

requiere transparentar su propósito, el procedimiento seguido y los criterios empleados. Estos planteamientos orientaron tanto la revisión documental como la organización argumentativa del artículo.

2.2. PREGUNTA DE REVISIÓN

La revisión se orientó mediante la siguiente pregunta:

¿Qué fundamentos conceptuales, documentales, argumentativos y éticos permiten orientar la construcción de un marco teórico coherente en proyectos de investigación de estudiantes de licenciatura en ingeniería?

De esta pregunta se derivaron cuatro núcleos de búsqueda: 1) naturaleza y funciones del marco teórico o conceptual; 2) procedimientos de búsqueda, selección y síntesis de literatura; 3) formación investigativa y escritura académica en educación superior, especialmente en ingeniería; 4) uso ético, crítico y verificable de inteligencia artificial generativa.

2.3. FUENTES DE INFORMACIÓN Y PERIODO

La estrategia contempla ERIC, SciELO, Redalyc, Dialnet y DOAJ para literatura educativa y latinoamericana; IEEE Xplore, Scopus, Dimensions y Web of Science para educación e investigación en ingeniería; Crossref para verificar metadatos y DOI; y documentos institucionales de UNESCO. Google Scholar se utiliza únicamente como apoyo de rastreo y localización, no como sustituto de la verificación en la fuente editorial. Se priorizan trabajos publicados entre 2021 y 2026; se incorporan textos de 2017 a 2020 cuando aportan fundamentos metodológicos y obras anteriores solo cuando resultan fundacionales.

2.4. ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA

Las búsquedas combinan términos en español e inglés, adaptados a la sintaxis de cada base:

(“marco teórico” OR “marco conceptual” OR “fundamentación teórica”) AND (ingeniería OR “educación en ingeniería”) AND (licenciatura OR pregrado OR universitarios).

(“theoretical framework” OR “conceptual framework”) AND (engineering OR “engineering education”) AND (undergraduate OR student) AND (research OR thesis).*

(“habilidades investigativas” OR “formación investigativa”) AND (ingeniería OR tecnología) AND (Latinoamérica OR “América Latina”).

("generative artificial intelligence" OR ChatGPT OR "large language model") AND (academic writing OR literature review OR citation) AND (education OR research).*

Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión.

Incluir	Excluir
Publicaciones arbitradas, libros académicos, normas y guías institucionales pertinentes.	Sitios sin autoría o fecha, piezas promocionales y referencias imposibles de verificar.
Relación explícita con construcción conceptual, búsqueda, síntesis, educación en ingeniería o IA académica.	Mención tangencial del marco teórico sin desarrollo conceptual o didáctico.
Metadatos completos y texto suficiente para comprobar la afirmación citada.	Registros duplicados, resúmenes sin información evaluable o documentos sin trazabilidad.
Evidencia latinoamericana pertinente y literatura internacional transferible.	Generalizaciones regionales derivadas de un solo caso o evidencia fuera de contexto.

Nota: La procedencia latinoamericana no se consideró, por sí sola, un criterio suficiente de incorporación. Cada fuente regional debía cumplir los mismos criterios de pertinencia, trazabilidad y calidad aplicados a la literatura internacional.

2.5. SELECCIÓN, EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN

La selección documental se desarrolló en etapas sucesivas. Primero se revisaron los títulos y resúmenes recuperados mediante las estrategias de búsqueda. Cuando un registro mostraba relación potencial con la pregunta de revisión, se consultó el texto completo para valorar su incorporación. Este procedimiento permitió descartar documentos cuya relación con el marco teórico, la formación investigativa, la educación en ingeniería o la inteligencia artificial generativa era únicamente tangencial.

La evaluación no se limitó al prestigio de la revista o a la disponibilidad del documento. Se consideraron la autoridad académica o institucional de la fuente, el proceso de arbitraje cuando correspondía, la actualidad, la coherencia metodológica, la correspondencia temática y la función que el texto podía desempeñar en la argumentación. Así, una publicación podía ser rigurosa y, aun así, no resultar pertinente para la pregunta planteada.

Las referencias seleccionadas se verificaron mediante seis datos: autoría, año, título, revista o editorial, DOI o URL estable y correspondencia entre el contenido consultado y la afirmación sustentada. Esta última comprobación fue indispensable, pues la existencia de una publicación o de un DOI válido no garantiza que la fuente respalde el uso que se hace de ella.

Las recomendaciones PRISMA 2020 y PRISMA-S se emplearon como referentes de transparencia para documentar las búsquedas y las decisiones de selección, sin presentar el manuscrito como una revisión sistemática (Page et al., 2021; Rethlefsen et al.,

2021). Su incorporación permitió reconocer qué elementos del proceso debían hacerse explícitos, aunque el diseño y el propósito de la revisión fueran narrativos e integrativos.

Para organizar la lectura se utilizó una matriz que registró el propósito de cada fuente, el diseño o contexto, los hallazgos pertinentes, sus limitaciones y la función que desempeñaría en el artículo. Esta última columna permitió distinguir entre documentos utilizados para definir conceptos, aportar evidencia, establecer contrastes, identificar vacíos o fundamentar las orientaciones didácticas.

Tabla 2. Matriz de análisis y síntesis.

Fuente	Propósito	Diseño/ contexto	Hallazgos	Limitaciones	Función en el artículo
[Autor, año]	Qué buscó conocer	Método, participantes o corpus	Aportes pertinentes	Alcance y restricciones	Definición, evidencia, contraste o orientación didáctica
[Autor, año]	Problema abordado	País, disciplina y nivel	Resultados relevantes	Transferibilidad	Vacío, ejemplo o criterio de decisión

Fuente: elaboración propia.

Después de la extracción, las aportaciones se organizaron en seis ejes: naturaleza del marco teórico; articulación con el diseño de investigación; búsqueda y evaluación documental; síntesis crítica; uso de inteligencia artificial; y didáctica para la formación en ingeniería. En cada eje se examinaron coincidencias, complementariedades, divergencias, condiciones de aplicación y vacíos. Esta organización permitió que la síntesis se construyera alrededor de problemas y relaciones temáticas, en lugar de presentar una sucesión de resúmenes individuales.

2.6. ALCANCE Y REGISTRO

La revisión no tuvo como propósito identificar exhaustivamente toda la literatura disponible ni estimar el efecto de una intervención. Se orientó a seleccionar y relacionar referentes conceptuales y empíricos pertinentes para construir una propuesta didáctica fundamentada. Esta delimitación explica el carácter narrativo e integrativo del trabajo, pero no elimina la necesidad de transparentar las decisiones seguidas durante la búsqueda, la selección y la síntesis.

Los criterios de PRISMA 2020 se utilizaron como apoyo para documentar esas decisiones, sin atribuir al estudio el alcance de una revisión sistemática (Page et al., 2021). La evidencia latinoamericana se incorporó cuando contribuía a comprender el problema o

a examinar su expresión en contextos educativos regionales. No se asumió, sin embargo, que la procedencia geográfica garantizara por sí misma la pertinencia de una fuente ni que América Latina constituyera un contexto homogéneo

3. NATURALEZA Y FUNCIONES DEL MARCO TEÓRICO

3.1. DISTINCIONES CONCEPTUALES

En la formación investigativa, expresiones como *teoría*, *marco teórico*, *marco conceptual* y *marco referencial* suelen utilizarse con alcances diferentes. La dificultad no se resuelve imponiendo una denominación única, pues las instituciones y tradiciones de investigación organizan estos componentes de distintas maneras. Lo necesario es precisar qué función cumple cada uno dentro del estudio y cómo contribuye a comprender el problema.

Una teoría articula conceptos y proposiciones para explicar relaciones o mecanismos y, cuando su naturaleza lo permite, formular predicciones. El marco teórico no equivale a reproducir una teoría: supone seleccionar y relacionar teorías, modelos y evidencia de acuerdo con las necesidades de una investigación concreta. El marco conceptual, por su parte, delimita los significados y las relaciones entre los conceptos que orientan el análisis, incluso cuando el estudio no adopta una teoría formal única.

El marco referencial puede emplearse como una categoría amplia que reúne antecedentes, contexto, conceptos, teorías, modelos y referentes técnicos. Su amplitud exige evitar que estos componentes se acumulen sin una función reconocible. La distinción propuesta en este artículo no pretende fijar una taxonomía universal, sino ofrecer al estudiante un criterio para decidir por qué incorpora cada referente y qué aporta a la construcción del problema, al diseño metodológico o a la interpretación.

Tabla 3. Componentes del marco teórico.

Componente	Pregunta que responde	Contenido central	Función
Teoría	¿Qué explica ompermite comprender el fenómeno?	Conceptos, relaciones y proposiciones	Explicación o comprender relaciones y, cuando corresponda, generar predicciones
Marco teórico	¿Desde qué perspectiva se estudiará?	Teorías, modelos y evidencia articulados	Fundamentar e interpretar
Marco conceptual	¿Qué significan y cómo se relacionan los conceptos?	Definiciones analíticas y relaciones	Precisar el lenguaje del estudio
Antecedentes	¿Qué se ha investigado y qué falta?	Métodos, hallazgos, límites y vacíos	Justificar y comparar

Componente	Pregunta que responde	Contenido central	Función
Contexto	¿Dónde, cuándo y bajo qué condiciones?	Sistema, proceso, población, ambiente y periodo	Delimitar la situación
Modelo	¿Cómo se representa el comportamiento?	Variables, parámetros, supuestos y ecuaciones	Analizar, simular o predecir
Norma o estándar	¿Qué requisitos o procedimientos aplican?	Criterios técnicos, de seguridad o desempeño	Verificar cumplimiento
Parámetro técnico	¿Qué magnitud caracteriza o restringe el sistema?	Valores, rangos, tolerancias o condiciones	Diseñar, controlar o comparar

Fuente: elaboración propia.

3.2. FUNCIONES

Las funciones del marco teórico se definen por las decisiones que ayuda a tomar durante la investigación. Algunas intervienen desde la delimitación inicial; otras adquieren mayor relevancia cuando se diseña el método o se interpretan los resultados. No operan como una lista de requisitos independientes, sino como dimensiones relacionadas de la coherencia del estudio.

En este sentido, el marco teórico permite:

- Delimitar el objeto y separar información central de información accesoria.
- Precisar conceptos, variables, parámetros, categorías y unidades de análisis.
- Explicitar supuestos epistemológicos, científicos y técnicos.
- Sustentar y revisar preguntas, objetivos, hipótesis o supuestos.
- Justificar decisiones de medición, modelación, diseño, muestreo o interpretación.
- Proporcionar criterios para analizar resultados y compararlos con antecedentes.
- Mantener coherencia entre problema, fundamentación, método, resultados y conclusiones.

Estas funciones no adquieren el mismo peso en todos los proyectos. La fundamentación de un experimento, por ejemplo, no se organiza del mismo modo que la de una simulación, un diagnóstico, un desarrollo tecnológico o una investigación sociotécnica. La diferencia depende del tipo de pregunta formulada, de la evidencia necesaria y de las decisiones que deberán justificarse.

Tabla 4. Particularidades según el proyecto de ingeniería.

Tipo de estudio	Referentes principales	Uso del marco
Experimental	Teoría física, variables, protocolos, incertidumbre	Formular hipótesis y explicar resultados
Correlacional	Constructos, variables, relaciones y controles	Justificar asociaciones esperadas
Simulación	Modelos matemáticos, supuestos, condiciones de frontera	Sustentar simplificaciones y validación
Diseño tecnológico	Necesidades, funciones, normas y criterios	Convertir evidencia en requisitos
Optimización	Función objetivo, restricciones y algoritmos	Justificar criterios de decisión
Diagnóstico	Indicadores, fallas, umbrales y contexto	Clasificar y valorar desempeño
Educación en ingeniería	Teorías de aprendizaje y evaluación	Interpretar prácticas y resultados formativos
Cualitativo o sociotécnico	Categorías, actores, contexto y poder	Comprender significados y relaciones

Fuente: elaboración propia.

4. ARTICULACIÓN ENTRE PROBLEMA, PREGUNTA, OBJETIVOS Y FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La relación entre el problema, la pregunta y la fundamentación teórica no sigue una secuencia lineal. El problema y las condiciones en las que se presenta orientan las primeras preguntas; a su vez, la lectura de la literatura puede mostrar que esas preguntas son demasiado amplias, que una relación ya fue suficientemente estudiada o que alguno de los conceptos centrales todavía carece de precisión. Construir el marco teórico implica volver sobre esas decisiones y ajustarlas conforme se comprende mejor el objeto de estudio.

Este movimiento también alcanza los objetivos, las hipótesis o los supuestos y, posteriormente, las decisiones metodológicas. Si una variable no puede definirse de manera consistente, si un parámetro carece de referente o si el método previsto no permite producir la evidencia requerida, el problema necesita revisarse. La coherencia no se comprueba únicamente al terminar el protocolo: se construye y se examina durante todo el proceso.

El primer obstáculo suele aparecer al confundir el tema con el problema. Un tema identifica un campo general de interés, por ejemplo: energías renovables, automatización industrial, inteligencia artificial o ergonomía; pero todavía no establece qué se desea conocer, explicar, comparar, diseñar o evaluar. Su amplitud permite iniciar una exploración documental, aunque no ofrece por sí misma una dirección investigable.

El problema comienza a configurarse cuando ese campo general se relaciona con una situación delimitada. Puede tratarse de una insuficiencia de conocimiento, una relación aún no explicada, una necesidad de diseño, una contradicción entre resultados, una condición de funcionamiento que debe evaluarse o una dificultad contextual que requiere comprensión. Lo importante es que la formulación permita reconocer qué se desconoce, respecto de qué unidad o sistema y bajo cuáles condiciones.

Tabla 5. Del tema al problema.

Nivel	Ejemplo	Debilidad o avance
Tema	Eficiencia energética	Demasiado amplio
Área	Eficiencia de sistemas de bombeo	Delimita tecnología
Situación problemática	Consumo elevado bajo cargas variables	Introduce condición observable
Problema investigable	Se desconoce cómo el régimen de operación incide en la eficiencia del sistema X durante el periodo Y	Delimita relación, unidad y contexto

Fuente: elaboración propia.

El ejemplo muestra que la delimitación no consiste solamente en añadir palabras a un tema. Cada avance introduce una decisión: primero se identifica una tecnología; después, una condición observable; finalmente, se establece una relación que puede investigarse en una unidad y un contexto determinados. El problema se vuelve investigable cuando esas decisiones hacen posible reconocer qué evidencia será necesaria.

La pregunta expresa el conocimiento que se pretende construir a partir del problema. Debe ser clara y delimitada, pero también viable frente al tiempo, los recursos, el acceso a la información y las condiciones reales del proyecto. Su formulación orienta la búsqueda documental porque permite decidir qué conceptos necesitan definirse, qué antecedentes resultan comparables y qué tipo de evidencia será pertinente.

No todas las preguntas de ingeniería producen el mismo tipo de conocimiento. Algunas buscan caracterizar un sistema; otras examinan relaciones, comparan alternativas, explican un comportamiento, diseñan una solución, valoran su desempeño o interpretan procesos sociotécnicos. Estas diferencias modifican las demandas de la fundamentación teórica.

Tabla 6. Tipos de preguntas y demandas teóricas.

Pregunta	Demanda principal	Resultado esperado
Descriptiva	Definir constructos, indicadores y condiciones	Caracterización
Relacional	Justificar variables y mecanismos posibles	Asociación

Pregunta	Demanda principal	Resultado esperado
Explicativa	Teoría causal, controles y alternativas	Explicación contrastable
Comparativa	Criterios equivalentes y antecedentes comparables	Diferencias contextualizadas
Diseño	Necesidades, funciones, normas y restricciones	Solución justificable
Evaluativa	Criterios de desempeño y referencia	Juicio sustentado
Interpretativa	Conceptos sensitivos y contexto sociotécnico	Comprensión situada

Fuente: elaboración propia.

La tabla 6 no pretende convertir las preguntas en categorías rígidas. Un proyecto puede articular más de una demanda; por ejemplo, describir las condiciones de funcionamiento de un sistema antes de evaluar su desempeño. Su utilidad consiste en anticipar qué referentes necesita el estudio y evitar que todas las investigaciones se fundamenten mediante la misma estructura.

La pregunta orienta el conocimiento que se busca construir; el objetivo general expresa ese propósito en términos de una acción investigativa. Ambos deben corresponderse, aunque no constituyen formulaciones idénticas. Si la pregunta busca comprender una relación, evaluar un desempeño o diseñar una solución, el objetivo necesita mantener ese alcance y no sustituirlo por una actividad instrumental.

Los objetivos específicos descomponen el propósito general en resultados parciales necesarios para alcanzarlo. Buscar información, aplicar una encuesta, realizar una simulación, elaborar gráficas o redactar conclusiones pueden formar parte del procedimiento, pero no expresan por sí mismas un logro de conocimiento. Verbos como *analizar*, *explicar*, *comparar*, *diseñar*, *interpretar* o *evaluar* son pertinentes cuando precisan qué se espera conocer o producir y sobre qué objeto recaerá la acción.

Las hipótesis y los supuestos tampoco son requisitos que deban incorporarse en todos los proyectos. Una hipótesis anticipa una relación susceptible de contrastación y necesita derivarse de fundamentos teóricos y antecedentes suficientes. Los supuestos pueden orientar estudios exploratorios o interpretativos, pero no deben redactarse como resultados conocidos de antemano. Su pertinencia depende de la pregunta, el enfoque y el diseño metodológico.

De manera semejante, no todos los estudios requieren las mismas unidades analíticas. Los proyectos experimentales o correlacionales suelen trabajar con variables; una simulación incorpora parámetros y supuestos del modelo; una investigación cualitativa se organiza mediante categorías; y un diseño tecnológico necesita requisitos y criterios

de desempeño. Distinguir estos elementos permite evitar que se introduzcan términos metodológicos solo para cumplir una estructura formal.

Tabla 7. Elementos analíticos y preguntas de control.

Elemento	Definición operativa	Pregunta de control
Variable	Propiedad que puede asumir diferntes valores y ser observada o medida	¿Cómo se define y y mediante qué procedimiento se observará?
Parámetro	Magnitud que caracteriza o restringe un modelo o diseño	¿Qué valor, rango o tolerancia aplica?
Categoría	Eje interpretativo para organizar significados, prácticas o procesos	¿Proviene de teoría, datos o ambos?
Requisito	Condición que una solución debe satisfacer	¿Qué necesidad, evidencia o norma lo justifica?
Criterio de desempeño	Regla para valorar una alternativa	¿Con qué umbral o referente se realizará la comparación?

Fuente: elaboración propia.

Preguntas de revisión: ¿la pregunta es clara y viable? ¿el objetivo general responde a ella? ¿cada objetivo específico produce un aporte necesario? ¿los conceptos centrales están definidos? ¿las hipótesis o supuestos derivan del marco? ¿las variables son medibles? ¿los parámetros y requisitos tienen fuente? ¿el método permite responder? ¿el análisis empleará los criterios teóricos? ¿las conclusiones podrán regresar a la pregunta?

Estas preguntas deben retomarse durante el desarrollo del proyecto. Una respuesta negativa no siempre implica corregir únicamente el elemento examinado; puede mostrar que es necesario revisar la pregunta, el alcance o la fundamentación

Tabla 8. Matriz de coherencia.

Problema/ pregunta	Objetivo	Conceptos o variables	Evidencia requerida	Método/ resultado
¿Cómo influye la geometría de palas en la eficiencia de un rotor pequeño?	Analizar la relación entre geometría y eficiencia	Relación de aspecto, ángulo de ataque, coeficiente de potencia, Reynolds	Modelos aerodinámicos, simulaciones y ensayos comparables	CFD/ensayo; curvas y contraste
¿Qué requisitos debe cumplir un sistema de monitoreo?	Diseñar y evaluar una solución	Confiabilidad, precisión, latencia y seguridad	Normas, necesidades de usuarios y soluciones previas	Prototipo; verificación por criterio

Fuente: elaboración propia.

La matriz no pretende condensar todo el protocolo. Su utilidad consiste en hacer visibles relaciones que suelen quedar distribuidas en apartados diferentes. En el primer

ejemplo, la pregunta relacional exige conceptos aerodinámicos, evidencia comparable y un procedimiento que permita contrastar la geometría con el desempeño. En el segundo, el diseño solo puede evaluarse si los requisitos y criterios fueron previamente sustentados. Si alguna columna no guarda relación con las demás, la matriz permite localizar dónde se encuentra la ruptura de coherenci.

5. BÚSQUEDA, SELECCIÓN, EVALUACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LAS FUENTES

5.1. PREPARAR LA BÚSQUEDA

La búsqueda comienza con una pregunta provisional y un mapa de conceptos, no con una frase extensa copiada en un buscador. Para cada concepto se registran sinónimos, variantes ortográficas, siglas, traducciones y términos más amplios o específicos. Los operadores AND, OR, NOT, comillas, truncamientos y campos de título o resumen se adaptan a cada plataforma.

Tabla 9. Ejemplo de búsquedas.

Concepto	Español	Inglés/variantes	Términos técnicos
Objeto	rotor eólico pequeño	small wind rotor; micro wind turbine	horizontal-axis wind turbine
Factor	geometría de palas	blade geometry; blade design	aspect ratio; angle of attack
Resultado	eficiencia	efficiency; performance	power coefficient; Cp
Método/contexto	simulación o ensayo	simulation; experiment	CFD; wind tunnel

Fuente: elaboración propia.

5.2. BÚSQUEDA HÍBRIDA Y REGISTRO

Una búsqueda estructurada en bases de datos puede combinarse con el rastreo retrospectivo de referencias, el rastreo prospectivo de citas y la búsqueda por autores o revistas clave. En ingeniería de software, Wohlin et al. (2023) encontraron que esta combinación permitió recuperar más estudios pertinentes que una estrategia basada exclusivamente en bases de datos. El hallazgo procede de un campo específico y no establece una regla universal, pero ofrece una razón didáctica para enseñar a los estudiantes a registrar y contrastar más de una vía de localización.

Tabla 10. Registro de cadenas de búsqueda.

Fecha/base	Ecuación y filtros	Resultados	Seleccionados	Decisión/notas
[dd/mm/aaaa]	[cadena exacta]	[n]	[n]	Motivos y ajustes, sin estimar cantidades

Fecha/base	Ecuación y filtros	Resultados	Seleccionados	Decisión/notas
[dd/mm/aaaa]	[cadena revisada]	[n]	[n]	Nuevos sinónimos o exclusiones

Fuente: elaboración propia.

La bitácora permite revisar decisiones, actualizar la búsqueda y evitar consultas repetidas. En ella se registra por qué se seleccionan artículos arbitrados, libros académicos, normas técnicas, patentes, informes o tesis, de acuerdo con la función que cumplirán en el estudio. Para cada documento se comprueban autoría, fecha, título, revista o editorial, DOI o URL estable y correspondencia temática.

Google Scholar puede ampliar el rastreo, pero sus resultados reúnen artículos, tesis, repositorios, prepublicaciones y versiones duplicadas. Por ello, el registro localizado funciona como una pista y cada documento debe comprobarse en la fuente editorial o institucional correspondiente.

5.3. EXISTENCIA, CALIDAD Y PERTINENCIA

Una fuente puede existir y ser rigurosa, pero no ser pertinente para la pregunta. Primero se comprueba su existencia; después se valora la calidad del proceso editorial o metodológico; finalmente se determina qué afirmación concreta puede sustentar. La pertinencia se evalúa por correspondencia con población o sistema, variables, contexto, método, fecha y función argumentativa. De igual manera, una norma técnica puede ser pertinente para evaluar cumplimiento, aunque no sea un artículo científico.

Tabla 11. Ejemplos de diversas fuentes.

Tipo de fuente	Criterios de calidad	Uso frecuente
Artículo empírico	Pregunta, diseño, muestra, instrumentos, análisis, límites	Evidencia y comparación
Revisión	Búsqueda, selección, evaluación y síntesis transparentes	Mapa del conocimiento
Artículo conceptual	Claridad de conceptos y lógica argumentativa	Definición y relaciones
Norma técnica	Organismo emisor, edición, vigencia y alcance	Requisito o procedimiento
Libro académico	Autoridad, editorial, actualidad o carácter fundacional	Base conceptual
Tesis/informe	Institución, método, datos y trazabilidad	Contexto o evidencia emergente

Fuente: elaboración propia.

5.4. JERARQUÍA FUNCIONAL Y VERIFICACIÓN

No existe una jerarquía única para toda afirmación: una norma vigente es preferible para un requisito; un artículo original, para un resultado específico; una revisión, para tendencias; y una obra fundacional, para la historia de un concepto. Antes de citar se contrasta la ficha bibliográfica con la página editorial o el DOI, se abre el texto, se localiza el pasaje pertinente y se registra la página o sección. Una cita generada automáticamente nunca se incorpora sin estas comprobaciones.

Tabla 12. Matriz documental ampliada.

Referencia	País/ contexto	Pregunta/ método	Hallazgo	Límite	Aporte propio	Cita/ localizador
[APA provisional]	[país/sistema]	[síntesis]	[resultado]	[restricción]	Definir, contrastar, justificar o problematizar	[página/ sección]

Fuente: elaboración propia.

Un semáforo facilita la depuración: verde, fuente verificada y directamente pertinente; amarillo, útil con reservas o pendiente de texto completo; rojo, no verificable, débil o irrelevante. La decisión se documenta para evitar que la disponibilidad reemplace al juicio académico.

6. DE LA LECTURA A LA SÍNTESIS CRÍTICA

La síntesis crítica transforma un conjunto de documentos en una explicación organizada del problema. Ese movimiento no se logra resumiendo cada fuente por separado, sino estableciendo relaciones entre conceptos, resultados, métodos, contextos y limitaciones.

Gómez Mendoza y Alzate Piedrahita (2017) relacionan la construcción del marco teórico con la elaboración conceptual, la argumentación y la retórica. Desde esta perspectiva, la cita adquiere sentido cuando el investigador explica por qué la fuente es pertinente, cómo se vincula con otras y qué modifica en la comprensión o en las decisiones del estudio.

Tabla 13. Operaciones discursivas.

Operación	Qué hace	Indicador textual
Resumir	Condensa una fuente	El estudio encontró...
Comparar	Relaciona dos o más aportes	Coincide/difiere...
Sintetizar	Construye un patrón transversal	En conjunto, la evidencia...

Operación	Qué hace	Indicador textual
Argumentar	Sostiene una afirmación con razones	Esto implica...
Problematizar	Expone tensión o límite	Sin embargo...
Asociar al estudio	Explica utilidad concreta	Para esta investigación...

Fuente: elaboración propia.

6.1. DE UN PÁRRAFO DÉBIL A UNO ANALÍTICO

Versión débil: “Autor A habla de habilidades investigativas. Autor B define el marco teórico. Autor C analiza la inteligencia artificial”. El párrafo yuxtapone autores, carece de una afirmación propia y no explica la relación entre las fuentes.

Versión mejorada: La construcción del marco teórico debe enseñarse como una práctica integrada de investigación y escritura. Mientras Gómez Mendoza y Alzate Piedrahita (2017) destacan su dimensión conceptual, argumentativa y retórica, Campos Hernández (2021) sitúa el aprendizaje de la investigación en actividades acompañadas y reflexivas. La experiencia de Estrada Molina et al. (2022) aporta evidencia latinoamericana de que las habilidades investigativas pueden incorporarse en una asignatura disciplinar de ingeniería. En conjunto, estos aportes justifican una ruta en la que el estudiante produce decisiones verificables y recibe retroalimentación progresiva, aunque la evidencia institucional disponible exige cautela al generalizar.

Una unidad argumentativa necesita una afirmación central, evidencia pertinente, una relación explícita entre las fuentes, interpretación autoral y una consecuencia para el problema investigado. Estas operaciones no siempre tienen que quedar encerradas en un solo párrafo. En ingeniería, por ejemplo, enumerar modelos de turbulencia no basta: es necesario comparar sus supuestos, condiciones de validez, costos y desempeño reportado antes de justificar cuál orientará la simulación.

6.2. RELACIONES ENTRE FUENTES

Coincidencia: varios trabajos sostienen una relación semejante.

Complementariedad: una fuente explica el mecanismo y otra aporta evidencia o contexto.

Divergencia: los resultados o conceptos son incompatibles y deben contextualizarse.

Evolución: una definición o método cambia a lo largo del tiempo.

Condicionalidad: el hallazgo depende de escala, población, material o ambiente.

Vacío: falta evidencia, comparación o explicación para el contexto investigado.

6.3. PROCEDIMIENTO DE SÍNTESIS

Definir una pregunta para cada apartado.

Codificar la función de cada fuente.

Agrupar por ejes y no por autores.

Identificar patrones, contradicciones y condiciones.

Formular una afirmación propia provisional.

Seleccionar la evidencia mínima suficiente y diversa.

Explicar límites y aplicabilidad al proyecto.

Revisar que cada párrafo avance la argumentación.

La voz autoral se hace visible en las decisiones de selección, comparación e interpretación, no en opiniones desvinculadas de la evidencia. Las citas textuales se reservan para formulaciones cuyo lenguaje exacto sea relevante e incluyen un localizador. La paráfrasis exige comprender, reformular y atribuir, sin sustituir palabras mecánicamente. De la misma manera, la evidencia latinoamericana se integra cuando ayuda a examinar el contexto del problema; añadirla como un apartado geográfico aislado no cumple esa función.

7. USO ÉTICO, CRÍTICO Y VERIFICABLE DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

7.1. PRINCIPIO RECTOR

La inteligencia artificial generativa puede apoyar algunas operaciones de búsqueda, organización y revisión, pero no asume responsabilidad por el contenido ni garantiza la veracidad de sus respuestas. Su incorporación al proceso de construcción del marco teórico requiere, por tanto, criterios pedagógicos, epistemológicos y éticos. Miao y Holmes (2023) destacan la agencia humana, la privacidad, la transparencia y la inclusión; Kasneci et al. (2023) y Weber-Wulff et al. (2023) documentan oportunidades educativas junto con riesgos de error, sesgo e integridad. Estos referentes no convierten a la herramienta en una fuente: delimitan las condiciones bajo las cuales puede utilizarse.

Tabla 14. Niveles de uso.

Nivel	Usos admisibles con verificación	Usos no admisibles
1. Apoyo lingüístico	Corrección, claridad, traducción de términos	Presentar texto automático como comprensión propia
2. Apoyo organizativo	Descriptores, categorías tentativas, tablas vacías	Inventar referencias, datos, resultados o lecturas
3. Apoyo analítico supervisado	Comparar fragmentos ya leídos, detectar preguntas	Delegar selección final, juicio crítico o conclusiones

Fuente: elaboración propia.

7.2. RIESGOS EPISTEMOLÓGICOS

Los modelos pueden producir títulos plausibles, combinar autores reales con artículos inexistentes o asociar un DOI válido con un documento diferente. Picazo-Sanchez y Ortiz-Martin (2026) muestran que comprobar la existencia del DOI es insuficiente: también deben coincidir el título, la autoría, el año, la revista y el contenido. A partir de esta distinción se consideran los siguientes riesgos:

a) Referencias, DOI o datos inexistentes.
b) Correspondencia falsa entre una fuente real y la afirmación.
c) Síntesis que borra condiciones, desacuerdos o límites.
d) Sesgos lingüísticos, geográficos y disciplinares.
e) Exposición de datos personales, inéditos o confidenciales.
f) Dependencia que impide desarrollar lectura, escritura y criterio.

7.3. PROTOCOLO DE VERIFICACIÓN DE SIETE PASOS

1. Definir la tarea y el límite de uso.
2. No introducir información sensible o restringida.
3. Conservar la instrucción y la salida relevante.
4. Tratar nombres, referencias y cifras como no verificados.
5. Localizar la fuente en el sitio editorial, base o repositorio.
6. Leer el texto y comprobar autor, título, fecha, DOI y pasaje.
7. Reescribir con criterio propio, citar la fuente original y declarar el uso cuando corresponda.

7.4. AUTORÍA, DIVULGACIÓN Y EVALUACIÓN

La autoría corresponde a personas capaces de responder por el contenido, declarar conflictos de interés y atender correcciones; una herramienta no puede asumir estas responsabilidades. Antes del envío deben consultarse las políticas de la revista o de la institución. Cuando sea pertinente, la declaración puede precisar la tarea realizada por la herramienta y el control ejercido por los autores: “Se utilizó una herramienta de IA generativa para proponer términos de búsqueda y revisar claridad lingüística. Todas las referencias, afirmaciones y decisiones analíticas fueron verificadas y aprobadas por los autores”. El ICMJE (2026) mantiene recomendaciones específicas para informar estos usos en la publicación académica.

Tabla 15.

Evidencia de aprendizaje	Qué permite evaluar
Bitácora de búsqueda	Decisiones y ajustes
Matriz con localizadores	Lectura y verificación
Versiones comentadas	Evolución de la argumentación
Defensa oral breve	Comprensión y autoría
Registro de IA	Transparencia y control humano

Fuente: elaboración propia.

8. ERRORES FRECUENTES Y ACCIONES DE MEJORA

Las dificultades en la construcción del marco teórico no son únicamente problemas de redacción. También pueden revelar fallas en la delimitación, la búsqueda, la lectura, la organización o la coherencia metodológica. Para reconocer su origen es necesario observar cómo el estudiante construye el texto y qué decisiones puede justificar.

Campos Hernández (2021) sostiene que aprender a investigar exige articular procesos epistemológicos, cognoscitivos, discursivos y metodológicos. Estrada Molina et al. (2022) muestran, en el contexto de una asignatura disciplinar de ingeniería, que las habilidades investigativas pueden trabajarse mediante actividades situadas. Ambas aportaciones orientan la atención hacia el proceso: la retroalimentación necesita acompañar la delimitación, la búsqueda y la síntesis, y no limitarse a corregir el producto final.

Tabla 16. Errores, consecuencias y prevención.

Error	Consecuencia	Acción correctiva
Acumular citas	Texto descriptivo	Redactar afirmación, evidencia, relación e implicación
Buscar sin pregunta	Corpus disperso	Delimitar fenómeno, unidad, contexto y propósito
Confundir antecedentes y teoría	Secciones redundantes	Asignar función a cada fuente
Contexto enciclopédico	Información irrelevante	Conservar solo condiciones explicativas
Fuentes no verificadas	Pérdida de credibilidad	Comprobar seis datos bibliográficos y contenido
Solo textos clásicos	Desactualización	Combinar fundamentos y evidencia reciente
Solo textos recientes	Pérdida de fundamentos	Incluir obras fundacionales justificadas
Conceptos ambiguos	Medición o análisis incoherente	Definir uso analítico y operacional
Hipótesis intuitivas	Contraste sin sustento	Derivarlas de teoría y evidencia
Objetivos como actividades	No expresan logro	Usar verbos cognoscitivos y productos claros

Error	Consecuencia	Acción correctiva
Normas sin vigencia	Requisitos incorrectos	Verificar edición y alcance
Generalizar un caso	Conclusiones excesivas	Declarar transferibilidad y límites
Ignorar divergencias	Sesgo de confirmación	Buscar explicaciones alternativas
Paráfrasis superficial	Riesgo de plagio	Comprender, reformular y citar
Citas secundarias innecesarias	Pérdida de contexto	Consultar la fuente original
Matriz sin uso	Trabajo mecánico	Convertir registros en patrones
IA como fuente	Errores no trazables	Citar originales y verificar
No declarar IA	Falta de transparencia	Registrar y divulgar según política
Desalineación método-marco	Resultados ininterpretables	Usar matriz de coherencia
APA incompleto	Inconsistencia editorial	Cruzar citas y referencias

Fuente: elaboración propia.

9. RUTA DIDÁCTICA PARA CONSTRUIR EL MARCO TEÓRICO

La ruta se organiza en cinco fases y quince momentos. Cada producto funciona como evidencia provisional: al revisarlo, el estudiante puede reconocer una inconsistencia y regresar a una decisión anterior.

Fase 1. Delimitación

Momento 1. Describir la situación problemática con evidencia inicial. Producto: ficha del problema.

Momento 2. Delimitar fenómeno, sistema o población, lugar, periodo y condiciones. Producto: enunciado delimitado.

Momento 3. Formular pregunta y objetivo provisional. Producto: primera matriz de coherencia.

Fase 2. Preparación de la búsqueda

Momento 4. Identificar conceptos, variables, parámetros o categorías. Producto: mapa conceptual inicial.

Momento 5. Construir descriptores en español e inglés. Producto: tabla de términos.

Momento 6. Definir bases, periodo y criterios. Producto: protocolo y bitácora de búsqueda.

Fase 3. Evaluación documental

Momento 7. Ejecutar búsquedas y depurar duplicados. Producto: registro reproducible.

Momento 8. Evaluar existencia, calidad y pertinencia. Producto: semáforo documental.

Momento 9. Leer y registrar localizadores, método, resultados y límites. Producto: matriz analítica.

Fase 4. Síntesis crítica

Momento 10. Agrupar fuentes por ejes. Producto: esquema argumentativo.

Momento 11. Identificar coincidencias, divergencias, condiciones y vacíos. Producto: matriz de síntesis.

Momento 12. Redactar párrafos con afirmación, evidencia, relación e implicación. Producto: borrador comentado.

Fase 5. Revisión de coherencia

Momento 13. Revisar alineación entre pregunta, objetivos, conceptos y método. Producto: matriz actualizada.

Momento 14. Verificar citas, referencias, normas y uso de IA. Producto: informe de trazabilidad.

Momento 15. Recibir retroalimentación, justificar decisiones y corregir. Producto: versión final y reflexión del autor.

Tabla 17. Ruta didáctica para la construcción del marco teórico.

Fase	Criterio de avance	Evidencia
Delimitación	Problema investigable y viable	Ficha y matriz
Búsqueda	Estrategia reproducible	Bitácora y ecuaciones
Evaluación	Fuentes verificadas y pertinentes	Matriz y semáforo
Síntesis	Argumentación temática	Esquema y borrador
Coherencia	Alineación y trazabilidad	Lista final y defensa

Fuente: elaboración propia.

9.1. ACTIVIDAD DE AULA Y RÚBRICA ABREVIADA

En una secuencia de taller, cada estudiante presenta una pregunta provisional, cinco fuentes verificadas y un párrafo de síntesis. Un compañero identifica la afirmación, la evidencia, la relación entre fuentes y la implicación. Después, el autor explica por qué seleccionó cada fuente y qué modificó a partir de la revisión. Con estas evidencias, el docente retroalimenta las decisiones antes de evaluar el formato del texto.

Tabla 18. Criterios de verificación.

Criterio	Inicial	En desarrollo	Logrado
Delimitación	Tema amplio	Problema parcial	Problema claro y viable
Fuentes	Disponibilidad	Calidad desigual	Pertinentes y verificadas
Síntesis	Lista de autores	Comparación parcial	Argumento integrado y crítico
Coherencia	Elementos aislados	Alineación incompleta	Pregunta, marco y método articulados
IA	Uso opaco	Registro parcial	Uso limitado, verificado y declarado

Fuente: elaboración propia.

10. LISTA FINAL DE VERIFICACIÓN

- La pregunta es clara, delimitada y viable.
- El objetivo general responde directamente a la pregunta.
- Los objetivos específicos contribuyen al objetivo general.
- Las hipótesis o supuestos son congruentes con el enfoque y tienen respaldo.
- Los antecedentes identifican métodos, hallazgos, límites y vacíos.
- El contexto incluye solo condiciones relevantes.
- Las teorías, modelos, conceptos y normas tienen una función explícita.
- Variables, parámetros, categorías y requisitos están definidos según el diseño.
- Las fuentes son pertinentes, verificables y suficientemente actuales.
- Se incluye evidencia latinoamericana sin generalizaciones indebidas.
- La redacción integra y compara fuentes.
- Se reconocen divergencias, condiciones y vacíos.
- Las citas textuales tienen localizador.
- Cada cita aparece en referencias y cada referencia fue consultada.
- Las normas técnicas corresponden a la edición vigente aplicable.
- El uso de IA está registrado, verificado y declarado cuando corresponde.
- No se incorporaron referencias o datos generados sin comprobación.
- El método permitirá responder la pregunta.
- El análisis previsto utiliza los criterios del marco.
- La versión final conserva trazabilidad de decisiones y revisiones.

11. CONSIDERACIONES FINALES

Construir el marco teórico de un proyecto de licenciatura en ingeniería no se resuelve reuniendo definiciones, resumiendo antecedentes o alcanzando un número

predeterminado de referencias. El trabajo decisivo comienza cuando el estudiante delimita qué necesita comprender, reconoce el conocimiento disponible y selecciona los referentes que le permiten explicar el fenómeno y fundamentar sus decisiones metodológicas. En este proceso, la dificultad no radica solamente en encontrar información, sino en establecer qué función cumple y por qué debe formar parte del estudio. Gómez Mendoza y Alzate Piedrahita (2017) sitúan precisamente en estas decisiones la elaboración conceptual y argumentativa del marco teórico.

Las distinciones desarrolladas en este artículo no pretenden establecer una nomenclatura universal. Su finalidad es evitar que componentes diferentes terminen reunidos como si fueran equivalentes. Una teoría aporta un sistema explicativo, mientras que el marco teórico articula los referentes elegidos con el problema investigado. El marco conceptual precisa los significados y relaciones que sostienen el análisis; los antecedentes permiten reconocer qué se ha estudiado, mediante qué procedimientos y con cuáles limitaciones. El contexto, por su parte, delimita las condiciones en las que ocurre el fenómeno, mientras que los modelos, las normas y los estándares proporcionan criterios propios del campo disciplinar. La utilidad de estas diferencias depende, por tanto, de la función que cada componente desempeñe dentro del proyecto y no únicamente del nombre asignado por una institución.

Esta organización tampoco queda establecida de una vez y para siempre. Al avanzar en la revisión de la literatura puede advertirse que un concepto necesita mayor precisión, que la pregunta conserva un alcance excesivo o que el método previsto no permite producir la evidencia requerida. Del mismo modo, una limitación metodológica puede conducir a revisar la pregunta o a buscar otros referentes. El marco teórico se construye así mediante un movimiento recursivo entre delimitación, fundamentación y decisiones metodológicas, que continúa durante el trabajo de campo, la experimentación o el desarrollo del diseño.

En los proyectos de ingeniería, este movimiento adquiere formas distintas según lo que se pretende conocer o producir. Un estudio experimental necesita sustentar las variables y las condiciones de prueba; una simulación debe justificar el modelo, los supuestos, los parámetros y los procedimientos de validación. En un desarrollo tecnológico, la fundamentación permite traducir necesidades y evidencia en requisitos, restricciones y criterios de desempeño. Cuando el estudio aborda procesos educativos o sociotécnicos, cobran relevancia las categorías relacionadas con el aprendizaje, las prácticas, los actores y el contexto. Estas diferencias muestran por qué una estructura uniforme podría ocultar decisiones que son centrales para la coherencia de cada proyecto

El estudio de Estrada Molina et al. (2022) aporta una experiencia latinoamericana en la que las habilidades investigativas se trabajaron dentro de una asignatura de Ingeniería en Ciencias Informáticas. Su carácter institucional impide generalizar los resultados, pero permite discutir una enseñanza concentrada exclusivamente en cursos generales de metodología. Para los fines de esta propuesta, interesa la posibilidad de aprender a construir el marco teórico al relacionarlo con problemas, modelos y decisiones de la formación profesional.

La ruta de cinco fases hace visibles decisiones que con frecuencia quedan implícitas: delimitar, preparar la búsqueda, evaluar fuentes, sintetizar y revisar la coherencia. Las bitácoras, matrices documentales, mapas conceptuales y registros de verificación permiten observar el proceso, no solo el texto final. Esta forma de acompañamiento es congruente con la concepción situada y reflexiva de la formación investigativa desarrollada por Campos Hernández (2021).

La inteligencia artificial generativa puede colaborar en tareas acotadas, como proponer descriptores, organizar notas o revisar la expresión lingüística. Sus resultados, sin embargo, pueden contener referencias inexistentes, metadatos alterados o síntesis que borran desacuerdos y condiciones. Por ello, Miao y Holmes (2023) sitúan la agencia humana y la validación crítica como condiciones de uso. La lectura, la selección de evidencia y la interpretación permanecen bajo responsabilidad de los autores.

El protocolo propuesto traduce esa responsabilidad en acciones verificables: localizar los documentos originales, comprobar sus metadatos, contrastar cada afirmación con el contenido y registrar la intervención de la herramienta. Declarar el uso es necesario, pero no sustituye el control humano ni la trazabilidad. Tampoco los detectores automáticos constituyen una prueba concluyente de autoría, dadas las limitaciones documentadas por Weber-Wulff et al. (2023).

La propuesta tiene un alcance introductorio: no establece una estructura universal ni demuestra todavía que la ruta mejore las habilidades investigativas. Su utilidad deberá examinarse mediante aplicaciones en contextos reales y de acuerdo con los criterios de cada disciplina, institución o revista.

Una aplicación posterior podría analizar las matrices, los borradores y las decisiones de búsqueda producidos por estudiantes de distintas ingenierías. Esa evidencia permitiría valorar cambios en la coherencia, la síntesis y la verificación documental, y decidir qué componentes de la ruta requieren ajuste.

REFERENCIAS

Barry, E. S., Merkebu, J., & Varpio, L. (2022). State-of-the-art literature review methodology: A six-step approach for knowledge synthesis. Perspectives on Medical Education, 11(5), 281–288. https://doi.org/10.1007/s40037-022-00725-9

Campos Hernández, M. Á. (2021). Didáctica de la investigación educativa. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones sobre la Universidad y la Educación. https://www.iisue.unam.mx/publicaciones/descargas/didactica-de-la-investigacion-educativa.pdf

Estrada Molina, O., Fuentes Cancell, D. R., & Simón Grass, W. (2022). La formación de habilidades investigativas en estudiantes de ingeniería: un estudio de caso. Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, 30(1), 109–123. https://doi.org/10.4067/S0718-33052022000100109

Gómez Mendoza, M. A., & Alzate Piedrahita, M. V. (2017). El marco teórico en los procesos de investigación educativa: elaboración, argumentación y retórica. Miradas, 1(6). https://doi.org/10.22517/25393812.15001

International Committee of Medical Journal Editors. (2026). Recommendations for the conduct, reporting, editing, and publication of scholarly work in medical journals: Use of artificial intelligence in publishing. https://www.icmje.org/recommendations/

Jaakkola, E. (2020). Designing conceptual articles: Four approaches. AMS Review, 10, 18–26. https://doi.org/10.1007/s13162-020-00161-0

Kasneci, E., Sessler, K., Küchemann, S., Bannert, M., Dementieva, D., Fischer, F., Gasser, U., Groh, G., Günnemann, S., Hüllermeier, E., Krusche, S., Kutyniok, G., Michaeli, T., Nerdel, C., Pfeffer, J., Poquet, O., Sailer, M., Schmidt, A., Seidel, T., Stadler, M., Weller, J., Kuhn, J., & Kasneci, G. (2023). ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. Learning and Individual Differences, 103, 102274. https://doi.org/10.1016/j.lindif.2023.102274

Miao, F., & Holmes, W. (2023). Guidance for generative AI in education and research. UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386693

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, 372, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Picazo-Sanchez, P., & Ortiz-Martin, L. (2026). Evaluating the integrity of LLM-generated citations: Prevalence and risks of fabricated references in scientific literature. Data, 11(5), 122. https://doi.org/10.3390/data11050122

Rethlefsen, M. L., Kirtley, S., Waffenschmidt, S., Ayala, A. P., Moher, D., Page, M. J., Koffel, J. B., & PRISMA-S Group. (2021). PRISMA-S: An extension to the PRISMA statement for reporting literature searches in systematic reviews. Systematic Reviews, 10, 39. https://doi.org/10.1186/s13643-020-01542-z

Varpio, L., Paradis, E., Uijtdehaage, S., & Young, M. (2020). The distinctions between theory, theoretical framework, and conceptual framework. Academic Medicine, 95(7), 989–994. https://doi.org/10.1097/ACM.0000000000003075

Weber-Wulff, D., Anohina-Naumeca, A., Bjelobaba, S., Foltýnek, T., Guerrero-Dib, J., Popoola, O., Šigut, P., & Waddington, L. (2023). Testing of detection tools for AI-generated text. International Journal for Educational Integrity, 19, 26. https://doi.org/10.1007/s40979-023-00146-z

Wohlin, C., Kalinowski, M., Felizardo, K. R., & Mendes, E. (2023). Successful combination of database search and snowballing for identification of primary studies in systematic literature studies. Information and Software Technology, 161, 107236. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2023.107236

CAPÍTULO 7

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE MICROTURBINAS HIDRÁULICAS

Data de submissão: 08/09/2026
Data de aceite: 21/09/2026

Nelson Ramiro Gutiérrez Suquillo
Universidad UTE
Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias
Carrera de Mecatrónica
Quito - Ecuador
https://orcid.org/0000-0003-2160-528X

Luis Miguel Sánchez Muyulema
Universidad UTE
Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias
Carrera de Mecatrónica
Quito - Ecuador
https://orcid.org/0000-0001-5078-3734

Jonnathan Ismael Chamba Cruz
Institución y Universidad UTE
Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias
Carrera de Electromecánica
Santo Domingo - Ecuador
https://orcid.org/0000-0003-2792-7271

Guillermo Raúl Tumalli Naranjo
Institución y Universidad UTE
Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias
Carrera de Electromecánica
Santo Domingo - Ecuador
https://orcid.org/0009-0002-9986-3000

RESUMEN: Este trabajo describe el proceso de diseño y simulación de un sistema que utiliza una micro turbina para generación de electricidad, de esta manera, se puede aprovechar la energía cinética del agua de las estaciones de bombeo de la empresa proveedora de agua potable de la ciudad de Quito (EPMAPS). La energía generada puede utilizarse para autoabastecer el sistema de control de estas instalaciones, esto permite asegurar el suministro de energía seguro e ininterrumpido a la estación, lo que garantiza un funcionamiento continuo con mínimas emisiones de CO_2. Primero, se determinaron los parámetros mecánicos de la estación para cuantificar la potencia eléctrica que se puede generar, con el valor de la energía mecánica y las características de la instalación, se eligió la turbina más adecuada para esta aplicación. Luego, se realizó el diseño hidráulico y eléctrico, que permite que la estación de bombeo se alimente ya sea con la energía de la red eléctrica o del sistema de generación hidráulica. Finalmente, se realizó la simulación del sistema hidráulico utilizando software CAE y análisis de elementos finitos (FEA) para validar la resistencia estructural y el análisis dinámico del sistema, de esta manera se corroboraron los datos obtenidos en la etapa de diseño.

PALABRAS CLAVE: energía renovable; agua potable; microturbina; energía hidroeléctrica; desarrollo sostenible.

ELECTRIC POWER GENERATION USING HYDRAULIC MICROTURBINES

ABSTRACT: This work describes the process of design and simulation of a system that uses a micro turbine to generate electricity, in this way, it is possible to take advantage of the kinetic energy of the water from the pumping stations of the drinking water supplier company of the city of Quito (EPMAPS). The energy generated can be used to self-supply the control system of these facilities, which ensures a safe and uninterrupted power supply to the station, which guarantees continuous operation with minimal CO_2 emissions. First, the mechanical parameters of the station were determined to quantify the electrical power that can be generated, with the value of the mechanical energy and the characteristics of the installation, the most suitable turbine for this application was chosen. Then, the hydraulic and electrical design was carried out, which allows the pumping station to be powered either with the energy of the electric grid or the hydraulic generation system. Finally, the simulation of the hydraulic system was carried out using CAE software and finite element analysis (FEA) to validate the structural resistance and the dynamic analysis of the system, in this way the data obtained in the design stage were corroborated.
KEYWORDS: renewable energy; drinking water; microturbine; hydropower; sustainable development.

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente, la matriz energética del Ecuador ha tenido una fuerte dependencia del petróleo y el gas natural como fuentes de energía primaria. De acuerdo al informe BP Statistical Review of World Energy (BP Magazine, 2022), estos combustibles representan aproximadamente el 76% de la energía consumida por el país. El detalle del porcentaje de fuentes energéticas, tanto en la oferta como en la demanda correspondiente al año 2021 se puede observar en las Figuras 1 y 2.

Figura 1. Oferta de energía primaria y secundaria en el Ecuador en el año 2021(Instituto de investigación Geológico y energetico, 2021).

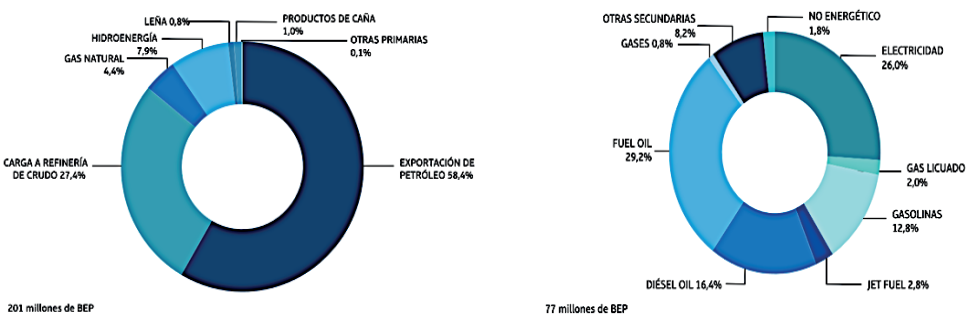
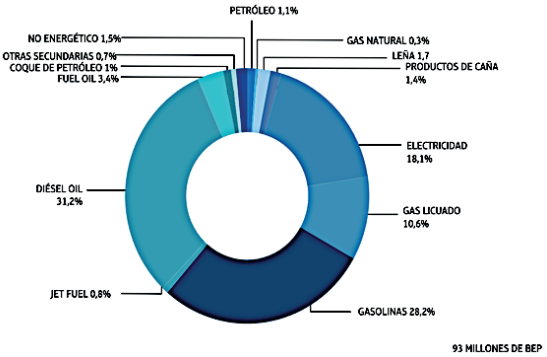
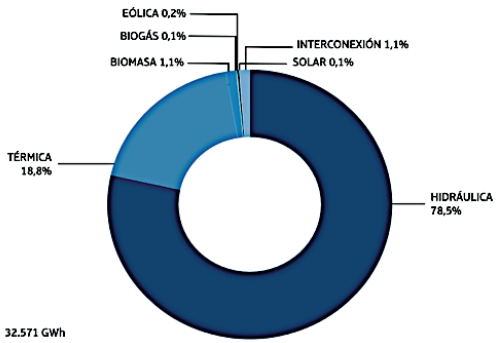


Figura 2. Demanda de energía en el Ecuador en el año 2021 (Instituto de investigación Geológico y energetico, 2021).



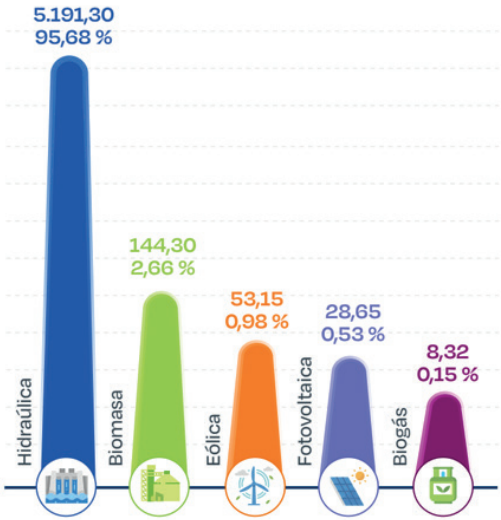
En lo referente a la generación de energía eléctrica se ha ido migrando de centrales térmicas hacia instalaciones hidroeléctricas de alta capacidad. Para el año 2022, la capacidad instalada en generación fue de 8864 MW, el 61% corresponde al uso de fuentes renovables (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables, 2022). El la Figura 3 se puede observar la generación eléctrica en el año para el periodo mencionado anteriormente.

Figura 3. Generación eléctrica por fuentes en Ecuador para el año 2021 (Instituto de investigación Geológico y energetico, 2021).



Con respecto a la potencia instalada para generación con recursos renovables un alto porcentaje (95.6%) está concentrado en la generación con grandes centrales hidroeléctricas, por lo cual se tiene una alta dependencia de este recurso para sostener el sistema eléctrico del país (Moya Puente et al., 2025) .

Figura 4. Potencia instalada en generación de energía eléctrica renovable en Ecuador en el año 2022 (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables, 2022).



El hecho de depender de un solo recurso energético ha provocado problemas, tanto en el año 2010 y recientemente en 2023, debido a los estiajes que se han manifestado con una reducción notable del caudal de los ríos de la cuenca oriental. El evento del 2023 obligó al aumento de importación de energía desde Colombia a precios más altos que los de generación nacional, la declaratoria de emergencia del sector eléctrico y apagones que afectaron a la economía del país (Chamorro & Mera, 2025). Esto es un claro indicador de que se requiere diversificar las fuentes de generación de energía eléctrica, impulsar la planificación, concesión e implementación de proyectos de baja y media potencia (Vélez Pizarro et al., 2024), además de impulsar una política de eficiencia energética que se aplique tanto a nivel industrial, residencial y comercial en el Ecuador (Chasiluisa Yanchatuña et al., 2024).

En el presente trabajo se plantea la búsqueda de alternativas para generación de energía eléctrica, con lo cual se aporte a solucionar los problemas relacionados con la alta dependencia de fuentes energéticas limitadas como el petróleo o la gran hidro-energía.

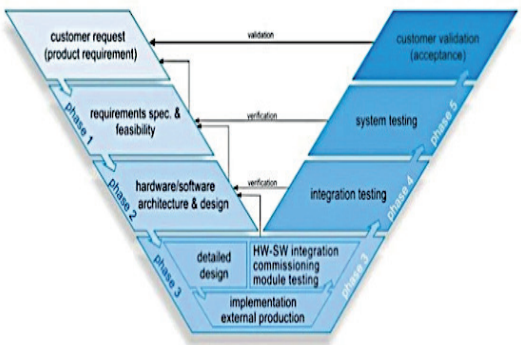
Se plantea el uso de agua potable, ya que la generación hidroeléctrica a través de sistemas pequeños y medianos utilizando micro turbinas tiene un alto rendimiento (Laghari et al., 2013), además de la ventaja de que, al trabajar con agua tratada. Esto aumenta la vida útil de las instalaciones, con lo cual esta infraestructura resulta económicamente viable, aportando a la reducción de emisión de gases de efecto invernadero para la generación de energía eléctrica que permita abastecer a las estaciones de bombeo

(Acharya et al., 2023). La tecnología de diseño y fabricación de micro turbinas ha tenido gran desarrollo en los últimos años, razón por la cual es posible encontrar alternativas que se adapten a diferentes aplicaciones e instalaciones (Chen et al., 2021).

2. METODOLOGIA

Para la elaboración de un producto o el diseño del mismo, se dispone de varios métodos o técnicas para el desarrollo y la resolución de posibles problemas que puedan presentarse en el proceso (Bricogne et al., 2025); el propósito de tener una metodología para desarrollar dispositivos mecatrónicos, es que permita involucrar a las tres ramas de la ingeniería como lo son la mecánica, electrónica e informática en un solo proceso y realizar una sinergia entre las disciplinas que están involucradas en la ingeniería mecatrónica, de esta manera se puede reducir los tiempos de implantación y diseño y los costos en la fabricación asociados al desarrollo del proyecto (Kellner et al., 2015). La metodología que mejor se acopla a este tipo de proyectos es el Modelo en V, cuyo esquema se muestra en la siguiente figura.

Figura 5. Modelo en V (Vazquez-Santacruz et al., 2023).



A partir de los datos que se obtuvieron en una estación de bombeo, se establecen los elementos de partida para el desarrollo del Sistema.

2.1. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

- Tubería: 6 pulgadas de radio
- Régimen de funcionamiento: 24 horas al día
- Potencia del sistema: 40 kWh por día
- Voltaje de alimentación: 220 Va.c. monofásico.

2.2. RESTRICCIONES DEL SISTEMA

- El material de fabricación de la turbina debe cumplir con normas específicas, debido a que el agua es para consumo humano
- Caudal del sistema: 110 a 150 Litros/s.
- Presión del sistema: 160 a 200 psi.

2.3. DISEÑO

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizó como caso de estudio a las estaciones de bombeo de agua potable de la EPMAPS, esta empresa se encarga del tratamiento y distribución de agua potable al Distrito Metropolitano de Quito cumpliendo con las normativas INEN de requisitos del agua potable para consumo humano (Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1108: Agua Potable: Requisitos., 2014) y buenas prácticas de manufactura para la prevención mediante planes de seguridad del agua e inspecciones (Roy, 2023).

Para el procesamiento del agua desde la fuente hasta los consumidores finales la estructura de la empresa consta de los siguientes componentes:

- Cuencas hídricas y zonas de conservación de agua
- Captación y conducción
- Plantas de tratamiento de agua potable
- Almacenamiento
- Distribución de agua potable
- Recolección y saneamiento.

El sistema de distribución está formado por una red de tuberías con una longitud de aproximadamente 7000 km y varias estaciones de bombeo distribuidas a través del territorio del distrito metropolitano de Quito. Estas estaciones funcionan de forma permanente en el transcurso del año por lo que el caudal de agua potable representa un recurso valioso y aprovechable para la generación de energía eléctrica (Kwon & Choi, 2025).

Los parámetros mecánicos para la selección de la micro turbina son (Bílková et al., 2025):

- Caudal del agua potable
- Presión del fluido
- Diámetro de la tubería.

Utilizando la ecuación de caudal se puede determinar la velocidad de ingreso del agua hacia la estación de bombeo:

$$Q = v \times A \quad (1)$$

Donde: Q= Caudal del agua,

A= Sección de la tubería,

v= Velocidad del agua al inicio de la tubería.

Reemplazando el área en función del diámetro, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$Q = v \times \frac{\pi \times d^2}{4} \quad (2)$$

Se obtiene la velocidad del agua, con los valores medidos para el caudal máximo: 150 L/s, v_1= 2.05 m/s y el caudal mínimo: 110 L/s, v_2= 1.51 m/s.

Con la información obtenida se puede determinar la potencia del sistema (Jawahar & Michael, 2017):

$$P_{Teorica} = (P - \Delta P) \times Q \times 0.0167\ [kW] \quad (3)$$

Donde: $P_{Teorica}$= La potencia del sistema,

P = La presión del sistema,

ΔP= La pérdida de presión en la tubería,

Q= Caudal.

Para determinar la potencia del sistema se debe hallar la pérdida de carga (Paraschiv et al., 2023).

$$\Delta P = f \times \frac{Leq \times v^2}{2 \times g \times d}\ [m.c.a] \quad (4)$$

Donde: ΔP = Perdida de presión del sistema,

f= Coeficiente de fricción en la tubería,

L_{eq}= Longitud equivalente de la tubería del sistema,

v= Velocidad del fluido,

d= Diámetro de la tubería,

g= Gravedad.

Luego se calcula el número de Reynolds para determinar el tipo de fluido y encontrar la perdida de carga:

$$R = \frac{d \times \delta \times v}{\mu} \quad (5)$$

Donde: μ= viscosidad del agua

Para calcular la velocidad máxima y velocidad mínima se debe determinar el Número de Reynolds:

- REV_{max}= 625250.
- REV_{min}= 460550.

En este caso, de acuerdo a los valores obtenidos, el fluido es de tipo turbulento.

La rugosidad relativa del material se determina con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{d} \qquad (6)$$

Donde: ε_r= Rugosidad relativa del material de la tubería,

ε = Rugosidad absoluta.

A partir de la rugosidad relativa, se procede a calcular el factor de fricción con la siguiente ecuación [16]:

$$f = 0.001375 \times [1 + \left(200 \times \varepsilon_r + \frac{10^6}{RE}\right).\frac{1}{3}] \qquad (7)$$

Factor de fricción para el caudal máximo, f_1= 2.993x10^{-3}.

Factor de fricción para el caudal mínimo, f_2= 3.164x10^{-3}.

Entonces, en este caso la perdida de presión en la tubería es:

- Perdida de carga (para Q_{max}), ΔP1= 103.1598 m.c.a
- Perdida de carga (para Q_{min}), ΔP2= 59.155 m.c.a

Una vez que se han determinado todos los parámetros anteriores, se puede determinar la potencia teórica del sistema de bombeo mediante la ecuación 4:

- Potencia (a P_{max} y Q_{max}), $P_{Teorica_M}$= 3.45 kW.
- Potencia (a P_{min} y Q_{min}), $P_{Teorica_m}$= 2.026 kW.

2.4. SELECCIÓN DE LA MICRO TURBINA

Hay varios parámetros que se deben considerar para la elección del conjunto turbina-generador (Hampel & Braun, 2022), en lo que se refiere a los parámetros eléctricos están:

- El tipo de voltaje (corriente continua o corriente alterna).
- En el caso de un sistema de AC, el número de fases.
- Valor del voltaje y frecuencia de salida.
- Eficiencia.

Una vez que se han determinado los valores críticos de operación: caudal, presión máxima, potencia mecánica y geometría de la tubería, se puede escoger el generador hidráulico que cumpla con estas especificaciones (Lillo et al., 2015).

Para este caso, se seleccionó una turbina “Micro Regen”, esta es una micro turbina hidráulica capaz de recuperar energía a la vez que regula la presión (Tecnoturbines powering water, 2024) .

Figura 6. Especificaciones de la micro turbina (Tecnoturbines powering water, 2024).

Especificaciones de la turbina

TIPO DE TURBINA	INLINE	INLINE R	INLINE HP
SISTEMA DE CONTROL ASOCIADO	Microregen o Hydroregen	Hydroregen	Microregen o Hydroregen
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS			
DISEÑO	Acoplamiento directo en línea con la conducción existente		
MONTAJE	Eje vertical u horizontal	Eje vertical	Eje vertical u horizontal
ACOPLAMIENTO	Bridas según EN1092-2		Bridas según EN 1092-2 ó rosca según EN ISO 228-1
DIÁMETROS DE ENTRADA/SALIDA mm (SEGÚN MODELO)	32 a 200	150 a 350	25 a 125
ESTANQUEIDAD	Cierre mecánico		
TIPO DE COJINETE	Rodamiento estándar de bolas		
FLUIDOS TURBINABLES	Agua potable, agua de riego, agua bruta de río, agua caliente sanitaria y agua de refrigeración		

Una característica muy importante en un generador es su rendimiento (Rodríguez-Pérez et al., 2024), ya que permite cuantificar la energía eléctrica obtenida a partir de la energía mecánica del sistema. La eficiencia de la turbina escogida es del 78%, por lo tanto, la potencia eléctrica generada en el sistema de bombeo es:

$$P_{real} = P_{Teorica} \times \eta \qquad (8)$$

Donde: η= eficiencia de la turbina.

De acuerdo a las características del sistema se obtuvieron los siguientes resultados:

- Potencia mínima: 1.58 [kW].
- Potencia máxima: 2.69 [kW].

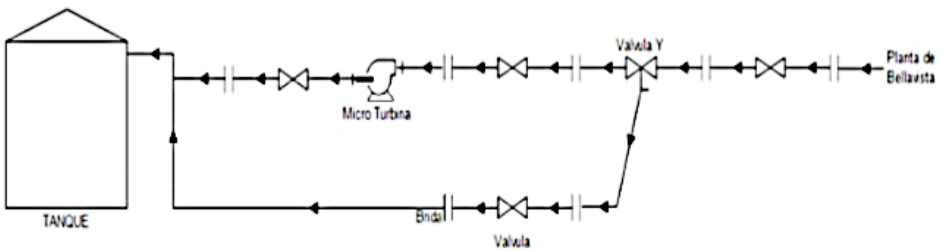
2.5. ELEMENTOS MECÁNICOS PARA EL MONTAJE DE LA MICRO TURBINA HIDRÁULICA

Luego del análisis realizado para el montaje, se determinó, que es necesario realizar una modificación en la tubería para tener una derivación del fluido acuoso dentro

del sistema en caso de mantenimiento o averías de la micro turbina hidráulica, para lo cual se colocará una válvula tipo Y, para que de esta manera se pueda desviar el flujo y se puedan realizar los procesos de mantenimiento o reparación de la micro turbina de esta manera para evitar que esta estación no se quede sin agua potable.

Una vez que se conoce el diámetro de la micro turbina hidráulica, se seleccionan bridas y válvulas para la instalación de tuberías. Tras la elección de válvulas y bridas para la instalación de la micro turbina, se realiza un diagrama para tener en cuenta cómo se debe colocar cada uno de los elementos mecánicos para la instalación del sistema de micro turbina.

Figura 7. Diagrama hidráulico del sistema.

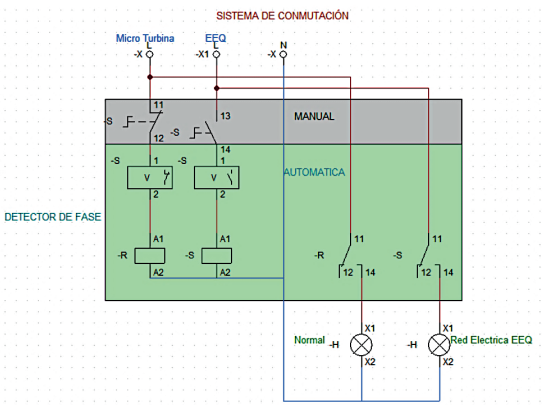


2.6. DISEÑO ELÉCTRICO

2.6.1. Sistema de conmutación eléctrica

El sistema de suministro de energía del panel estaba provisto de un sistema de conmutación para garantizar un suministro continuo de energía al panel de control. También permitirá el respectivo mantenimiento de la micro turbina sin tener que dejar la placa sin energía.

Figura 8. Sistema de conmutación.



3. SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

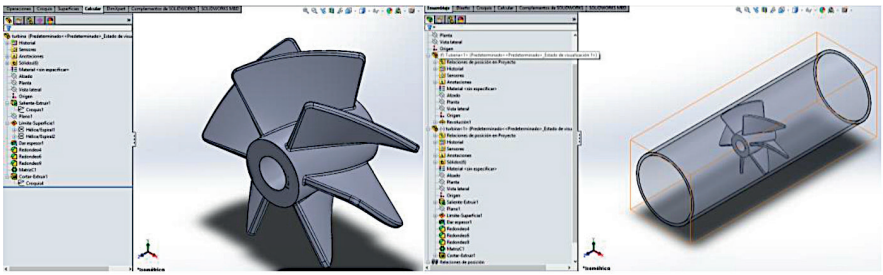
Para realizar la validación del sistema, se realizó la simulación de la turbina dentro de la tubería, cumpliendo con el siguiente protocolo:

El modelado del proyecto se realiza a través de un software CAD, modelando los siguientes elementos del sistema:

- Tubería de 12 pulgadas a través de la cual circula el agua potable
- Eje de turbina
- Las cuchillas alrededor del eje.

Luego, la simulación del proyecto debe realizarse a través de una herramienta de ingeniería asistida por computadora (software CAE).

Figura 9. Modelamiento de la microturbina.

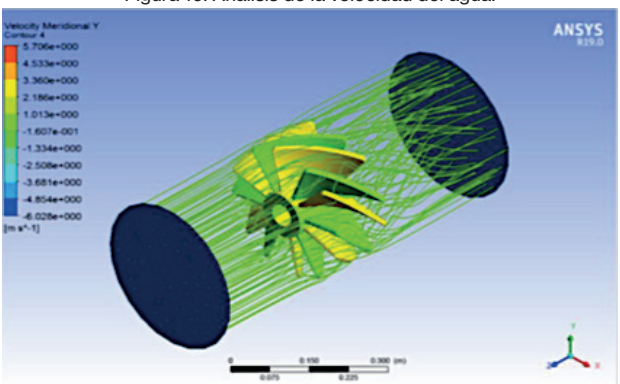


3.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Mediante la simulación se analizaron los siguientes parámetros del sistema: velocidad, torque y presión del fluido, con valores para los cuales la micro turbina está sometida al mayor esfuerzo.

En la Figura 10 muestra la velocidad del agua potable dentro de la tubería de alimentación en la que ha establecido que debe montarse la turbina.

Figura 10. Análisis de la velocidad del agua.



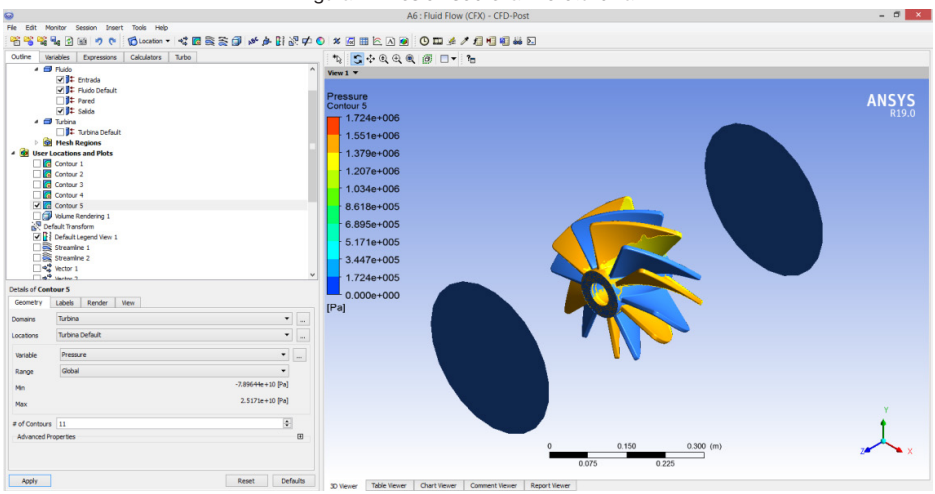
En la Tabla 1 se muestran los valores de diseño y de simulación, así como el error calculado entre estos. Hay que tomar en cuenta que, en la simulación no se considera algunos parámetros como la forma de la tubería y la fricción que ejerce con el agua.

Tabla 1. Error de la velocidad de la micro turbina.

VARIABLE	**VALOR DISEÑO** [m/s]	**VALOR SIMULACION** [m/s]	**ERROR** [%]
Velocidad	2.05	2.186	6.53

En la Figura 11 se puede observar los resultados de la simulación de las condiciones de presión del agua sobre la micro turbina.

Figura 11. Presión sobre la microturbina.



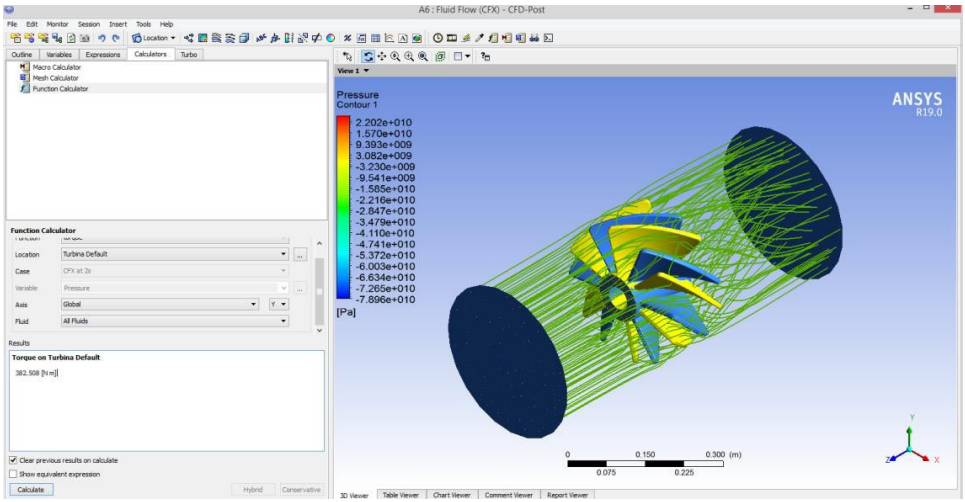
En la Tabla 2 se realiza la comparación entre la presión calculada en la fase de diseño y el valor obtenido en la simulación. En este caso el error es de aproximadamente el 12%, este valor es alto debido a que en la simulación únicamente se modelo la porción de tubería que contiene la turbina y no se tomó en cuenta los accesorios del sistema de tuberías que son los elementos que producen caída de presión.

Tabla 2. Error de la presión sobre la micro turbina.

PARAMETRO	**VALOR DISEÑO** [MPa]	**VALOR SIMULACION** [MPa]	**ERROR** [%]
Presión	1.379	1.551	12.47

La Figura 12 indica la simulación del torque en la micro turbina, 382.508 Nm es el torque que produce la potencia máxima en el generador.

Figura 12. Torque de la micro turbina.



Con el valor del torque que se obtiene de la simulación. se puede calcular la potencia mecánica del agua al fluir por la tubería:

$$P = T \times w \qquad (9)$$

Donde: P= Potencia mecánica,

T= Torque,

W= velocidad angular de la turbina.

Realizando el cálculo se obtiene que la potencia es de 5.13 kW, este valor resulta mayor que el valor de diseño, debido a que en la simulación no se ha tomado en cuenta la caída de presión debido a la turbina y el rozamiento del agua con la superficie interna de la tubería, pero se verifica que la potencia obtenida en condiciones ideales es mayor que la potencia calculada.

4. CONCLUSIONES

Las microturbinas hidráulicas se presentan como una solución viable y efectiva para la generación de energía eléctrica, especialmente en contextos donde se están implementando sistemas sostenibles y accesibles. Además, esta tecnología promueve la autosuficiencia energética en comunidades rurales y aisladas y también garantiza el funcionamiento de sistemas básicos como el suministro de agua potable, promoviendo el desarrollo social y económico a través de la creación de empleo y la mejora de la calidad de vida.

Se determinó que las condiciones que presenta la instalación portátil de bombeo de agua estudiada son adecuadas, ya que los valores de caudal y presión de fluido permiten obtener una potencia máxima de 3,45 kW, con la que se pueden abastecer los paneles de control y tener un excedente que se puede almacenar para ser utilizado en sistemas complementarios, aprovechando al máximo la energía disponible.

Las instalaciones de bombeo de agua potable tienen un funcionamiento ininterrumpido, es decir, funcionan las 24 horas y los 7 días de la semana, con lo cual el factor de planta de la estación generadora eléctrica estaría muy cerca del valor de 1, que es óptimo para un sistema de generación.

En el diseño de sistemas de generación con microturbinas, es muy importante que los proyectos se basen en un enfoque integral que contemple un diseño mecánico, eléctrico y electrónico adecuado, así como un método riguroso para la selección de microturbinas, asegurando su eficiencia y adaptabilidad a las condiciones específicas de cada ubicación. El desarrollo de pequeños y medianos proyectos de generación de energía es adecuado para fortalecer la matriz energética de países como Ecuador, esto no solo representa un avance hacia la sostenibilidad, sino que también se alinea con la necesidad global de generar energía de una manera más limpia y accesible. Con el apoyo adecuado en términos de políticas públicas y financiación, estos sistemas pueden desempeñar un papel fundamental en la transición energética y en el fomento de un futuro más sostenible.

BIBLIOGRAFIA

Acharya, S., Datta, R., & Debnath, B. (2023). Theoretical and experimental investigations of an integrated rainwater harvesting system for electricity and drinking water. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(24), 66359–66371. https://doi.org/10.1007/s11356-023-27120-z

Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables. (2022). Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2022. https://drive.google.com/file/d/1ugXI0-ZeH69YsqKpS9fUDIDoXItjt839/view

Bílková, E., Nowak, P., Halych, O., & Vovk, L. (2025). Water Microturbines for Drinking Water Industry BT - Proceedings of CEE 2025 (Z. Blikharskyy, D. Katunský, & L. Lichołai (eds.); pp. 271–281). Springer Nature Switzerland.

BP Magazine. (2022). BP Statistical Review of World Energy 2022. 68 Edition. https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf.

Bricogne, M., Le Duigou, J., & Eynard, B. (2025). Design Processes of Mechatronic Systems BT - Mechatronic Futures: Further Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers (P. Hehenberger & D. Bradley (eds.); pp. 165–181). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-83571-1_9

Chamorro, J., & Mera, E. (2025). Estudio de la crisis energética en el Ecuador por la dependencia en la generación de energía hidráulica. Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación. ISSN: 2697-3693., 8(15 SE-), 168–186. https://www.journalingeniar.org/index.php/ingeniar/article/view/286

Chasiluisa Yanchatuña, S. M., León Troya, Y. C., Caicedo Romero, H. M., & López Villavicencio, W. M. (2024). Alternativas de generación eléctrica en Ecuador: retos y desafíos. Polo Del Conocimiento; Vol 9, No 10 (2024): OCTUBRE. https://doi.org/10.23857/pc.v9i10.8165

Chen, H., Kan, K., Wang, H., Binama, M., Zheng, Y., & Xu, H. (2021). Development and Numerical Performance Analysis of a Micro Turbine in a Tap-Water Pipeline. In Sustainability (Vol. 13, Issue 19, p. 10755). https://doi.org/10.3390/su131910755

Hampel, C. A., & Braun, R. J. (2022). Off-design modeling of a microturbine combined heat & power system. Applied Thermal Engineering, 202, 117670. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117670

Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1108: Agua Potable: Requisitos., Pub. L. No. 1108 (2014).

Instituto de investigación Geológico y energetico. (2021). Balance energético nacional 2021. Pagina Web Ministerio de Energía y Minas. https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2022/08/Balance_Energético_Nacional_2021-VF_opt.pdf

Jawahar, C. P., & Michael, P. A. (2017). A review on turbines for micro hydro power plant. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 72, 882–887. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.133

Kellner, A., Hehenberger, P., Weingartner, L., & Friedl, M. (2015). Design and use of system models in mechatronic system design. 2015 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE), 142–149. https://doi.org/10.1109/SysEng.2015.7302747

Kwon, H. G., & Choi, Y. H. (2025). Development of a technique to optimize micro-hydro turbine location and capacity for optimal pressure control and energy recovery in water systems. Journal of Computational Design and Engineering, 12(2), 61–72. https://doi.org/10.1093/jcde/qwaf010

Laghari, J. ~A., Mokhlis, H., Bakar, A. ~H. ~A., & Mohammad, H. (2013). A comprehensive overview of new designs in the hydraulic, electrical equipments and controllers of mini hydro power plants making it cost effective technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20, 279–293. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.002

Lillo, P., Ferrer-Martí, L., Fernández-Baldor, Á., & Ramírez, B. (2015). A new integral management model and evaluation method to enhance sustainability of renewable energy projects for energy and sanitation services. Energy for Sustainable Development, 29, 1–12. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.08.003

Moya Puente, M. F., Huerta Cruz, S., & Yagual Velastegui, A. (2025). CRISIS ENERGÉTICA EN ECUADOR: ANÁLISIS DESDE UNA PANORÁMICA ECONÓMICA Y SOCIAL. Revista Científica y Arbitrada de Ciencias Sociales y Trabajo Social: Tejedora. ISSN: 2697-3626, 8(19 SE-Artículos), 457–475. https://doi.org/10.56124/tj.v8i19.029

Paraschiv, S., Paraschiv, L. S., & Serban, A. (2023). An overview of energy intensity of drinking water production and wastewater treatment. Energy Reports, 9, 118–123. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.08.074

Rodríguez-Pérez, A. M., Rodríguez-Gonzalez, C. A., López, R., Hernández-Torres, J. A., & Caparrós-Mancera, J. J. (2024). Water Microturbines for Sustainable Applications: Optimization Analysis and

Experimental Validation. Water Resources Management, 38(3), 1011–1025. https://doi.org/10.1007/s11269-023-03706-7

Roy, A. (2023). A Solution for Providing Water and Energy Through Optimal Renewable Energy Integration: A Design Space Approach BT - Emerging Trends in Mechanical and Industrial Engineering: Select Proceedings of ICETMIE 2022 (X. Li, M. M. Rashidi, R. S. Lather, & R. Raman (eds.); pp. 917–930). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6945-4_69

Tecnoturbines powering water. (2024). Hydroregen Technical specifications. https://tecnoturbines.com/wp-content/uploads/2020/12/SUNWA-ficha-tecnica-hydroregen-EN.pdf.

Vazquez-Santacruz, J. A., Portillo-Velez, R., Torres-Figueroa, J., Marin-Urias, L. F., & Portilla-Flores, E. (2023). Towards an integrated design methodology for mechatronic systems. Research in Engineering Design, 34(4), 497–512. https://doi.org/10.1007/s00163-023-00416-4

Vélez Pizarro, A. M., Marquinez Viscaíno, J. F., Vega Jaramillo, F. Y., & Vega Granda, A. del C. (2024). Desarrollo sostenible de Ecuador a través del desarrollo de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable. RECIMUNDO, 8(2 SE-Artículos de Investigación), 103–113. https://doi.org/10.26820/recimundo/8.(2).abril.2024.103-113

CAPÍTULO 8

ENERGÍA DE LAS MAREAS, AGUA Y AIRE

Data de submissão: 24/08/2026
Data de aceite: 09/09/2026

Antonio Rabina Merelas
Universidade da Coruña (UDC)
Escola Técnica Superior de
Náutica e Máquinas
A Coruña, Galicia, España
https://orcid.org/0009-0004-5636-7087

RESUMEN: La descarbonización del sector energético constituye un proceso necesario ante las evidencias del cambio climático y otros efectos que afectan al equilibrio ambiental del planeta. Este proceso implica una transformación en el uso de las fuentes primarias de energía y el desarrollo de alternativas renovables, entre ellas la energía solar, eólica y marina. En este contexto, la mejora de las tecnologías involucradas resulta fundamental para lograr un mayor aprovechamiento de los recursos energéticos, incrementar la fiabilidad de los sistemas y mejorar su rendimiento económico. El presente trabajo propone una alternativa para mejorar el aprovechamiento energético de las mareas. Los sistemas maremotrices convencionales utilizan principalmente el movimiento y la energía potencial de una masa de agua de mar, de forma semejante al funcionamiento de las centrales hidroeléctricas. Sin embargo, el desplazamiento de esta masa de agua lleva asociado simultáneamente el movimiento de una masa de aire, cuya energía también podría ser aprovechada si el aire se encuentra confinado en un recinto. La propuesta consiste, por tanto, en estudiar el aprovechamiento conjunto del agua de mar y del aire atmosférico mediante un recinto cerrado que permita controlar sus desplazamientos y utilizarlos para accionar turbinas destinadas a la generación de energía eléctrica. Asimismo, se considera el fenómeno de resonancia como un factor relevante en el aprovechamiento de la energía de las mareas, dado que determinadas características geométricas de bahías, estuarios u otros accidentes geográficos pueden favorecer amplitudes de marea considerablemente superiores a las habituales.
PALABRAS CLAVE: agua; aire; energía maremotriz; mareas; resonancia.

TIDAL ENERGY, WATER AND AIR

ABSTRACT: The decarbonization of the energy sector is a necessary process in response to the evidence of climate change and other effects that disrupt the planet's environmental balance. This process involves transforming the use of primary energy sources and developing renewable alternatives, including solar, wind, and marine energy. In this context, improving the technologies involved is essential to achieve more efficient use

of energy resources, increase system reliability, and enhance economic performance. This study proposes an alternative approach to improving the utilization of tidal energy. Conventional tidal energy systems primarily exploit the movement and potential energy of seawater masses, in a manner similar to hydroelectric power plants. However, the displacement of a mass of seawater simultaneously causes the movement of a mass of air, whose energy could also be harnessed if the air is confined within an enclosure. The proposal therefore consists of investigating the combined use of seawater and atmospheric air within a closed enclosure that allows their displacement to be controlled and used to drive turbines for electricity generation. Resonance is also considered a relevant factor in tidal energy utilization, since certain geometric characteristics of bays, estuaries, or other geographical features may contribute to tidal amplitudes considerably greater than those typically observed.
KEYWORDS: air; resonance; seawater; tidal energy; tides.

ENERXÍA DAS MAREAS, AUGA E AIRE

RESUMO: A descarbonización do sector enerxético constitúe un proceso necesario ante as evidencias do cambio climático e outros efectos que afectan o equilibrio ambiental do planeta. Este proceso implica unha transformación no uso das fontes primarias de enerxía e o desenvolvemento de alternativas renovables, entre elas a enerxía solar, eólica e mariña. Neste contexto, a mellora das tecnoloxías implicadas resulta fundamental para lograr un maior aproveitamento dos recursos enerxéticos, incrementar a fiabilidade dos sistemas e mellorar o seu rendemento económico. O presente traballo propón unha alternativa para mellorar o aproveitamento enerxético das mareas. Os sistemas de enerxía mareomotriz convencionais utilizan principalmente o movemento e a enerxía potencial dunha masa de auga de mar, de maneira semellante ao funcionamento das centrais hidroeléctricas. Porén, o desprazamento desta masa de auga leva asociado simultaneamente o movemento dunha masa de aire, cuxa enerxía tamén podería ser aproveitada se o aire se atopa confinado nun recinto. A proposta consiste, polo tanto, en estudar o aproveitamento conxunto da auga de mar e do aire atmosférico mediante un recinto pechado que permita controlar os seus desprazamentos e utilizalos para accionar turbinas destinadas á xeración de enerxía eléctrica. Así mesmo, considérase o fenómeno da resonancia como un factor relevante no aproveitamento da enerxía das mareas, dado que determinadas características xeométricas de baías, esteiros ou outros accidentes xeográficos poden favorecer amplitudes de marea considerablemente superiores ás habituais.
PALABRAS CLAVE: auga; aire; enerxía mareomotriz; mareas; resonancia.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de avanzar hacia la descarbonización del sector energético, ante las evidencias del cambio climático y los impactos ambientales asociados al uso intensivo de combustibles fósiles, ha impulsado la búsqueda y el desarrollo de fuentes de energía alternativas.

El consumo mundial de energía se estima en aproximadamente 600 exajulios, con una participación de las fuentes procedentes de combustibles fósiles superior al 80 %. Asimismo, durante el período 2015-2018, el crecimiento del consumo energético se situó entre el 2 % y el 3 %, mientras que en 2019 se registraron valores de entre el 0,6 % y el 0,7 %. Las proyecciones apuntan, además, a un posible incremento del consumo de hasta un 50 % hacia el año 2050.

Este escenario evidencia la necesidad de ampliar el aprovechamiento de fuentes energéticas diferentes de los combustibles fósiles y, paralelamente, desarrollar tecnologías que permitan mejorar la eficiencia con la que se utilizan los recursos renovables disponibles.

Entre estas alternativas se encuentra la energía marina y, específicamente, la energía de las mareas. Los sistemas convencionales de aprovechamiento mareomotriz utilizan fundamentalmente el movimiento y la energía potencial de grandes masas de agua de mar. Sin embargo, el desplazamiento vertical del agua lleva asociado simultáneamente el desplazamiento de una masa de aire, cuya energía también puede ser susceptible de aprovechamiento cuando dicho aire se encuentra confinado.

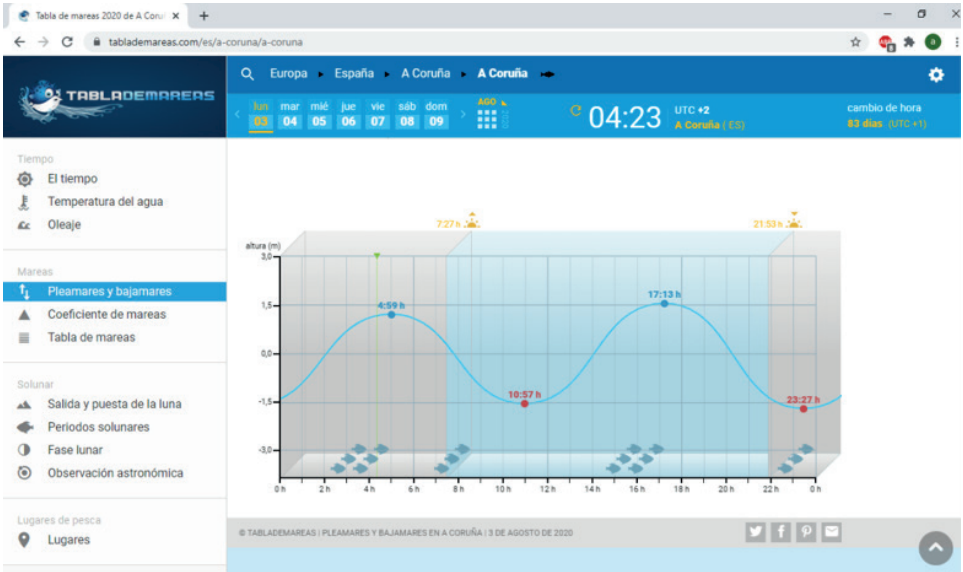
A partir de este planteamiento, el presente trabajo propone estudiar el aprovechamiento simultáneo de la energía potencial asociada a las mareas y del volumen de aire desplazado y comprimido por el movimiento vertical del agua de mar dentro de un recinto cerrado. El objetivo es analizar conceptualmente la posibilidad de utilizar ambos fluidos como elementos capaces de accionar turbinas conectadas a generadores eléctricos y, de este modo, explorar si el sistema permitiría incrementar la energía susceptible de aprovechamiento por unidad de volumen de agua de mar embalsada.

2. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA PROPUESTO

El sistema propuesto se basa en el almacenamiento de aire y agua de mar en un recinto cerrado, con el propósito de utilizar ambos fluidos para accionar turbinas conectadas a generadores de energía eléctrica.

Para describir su funcionamiento, se toma como referencia la evolución de las mareas en A Coruña el 3 de agosto de 2020 (Figura 1), considerando los siguientes puntos horarios: 10:57 h, correspondiente a la bajamar; 17:13 h, correspondiente a la pleamar; y 23:57 h, correspondiente a la siguiente bajamar.

Figura 1. Evolución de las mareas en A Coruña el 3 de agosto de 2020.



Para el análisis se considera un intervalo de tres horas alrededor de cada uno de estos puntos de referencia (±1 h 30 min), de manera que cada punto constituye el centro de su respectivo intervalo temporal.

Se establece como nivel de marea baja un nivel ligeramente superior al mínimo real de la marea, correspondiente a los siguientes puntos horarios: 9:27 h y 12:27 h para la bajamar de las 10:57 h, y 21:57 h y 24:57 h para la bajamar de las 23:57 h.

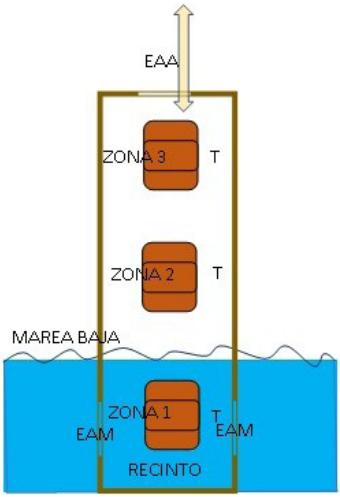
Asimismo, se establece como nivel de marea alta un nivel ligeramente inferior al máximo real de la marea, correspondiente a las 15:43 h y 18:43 h, dentro del intervalo asociado a la pleamar de las 17:13 h.

En estos intervalos, el crecimiento y el decrecimiento de la marea son más lentos.

Para describir el funcionamiento del sistema, se toma como punto de partida las 12:27 h, momento en el que la marea alcanza el nivel definido anteriormente como nivel de marea baja.

La Figura 2 representa un recinto situado en el mar y solidario con el fondo marino, cuyas paredes deben ser capaces de soportar las presiones ejercidas por el agua de mar y por el aire atmosférico almacenados en su interior.

Figura 2. Representación esquemática del recinto en situación de marea baja.



El recinto dispone de entradas y salidas de agua de mar (EAM), así como de entradas y salidas de aire atmosférico, que pueden encontrarse abiertas (EAA) o cerradas (EAC). En su interior se disponen turbinas (T), susceptibles de ser accionadas por los flujos de agua de mar o de aire atmosférico para mover generadores eléctricos y transformar los desplazamientos asociados a las subidas y bajadas de las mareas en energía eléctrica.

En el recinto se distinguen tres zonas:

Zona 1. Las turbinas serían accionadas por el flujo de agua de mar.

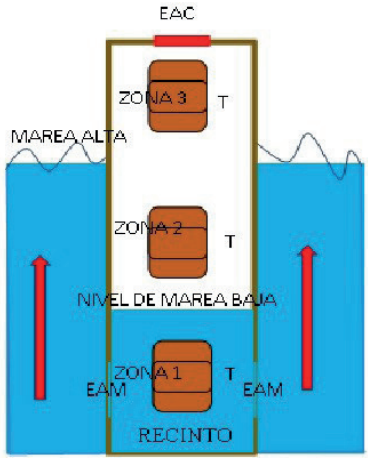
Zona 2. Las turbinas podrían ser accionadas por flujos de agua de mar y de aire, aunque esta configuración podría no constituir la opción más adecuada.

Zona 3. Las turbinas serían accionadas por el flujo de aire atmosférico.

En la situación representada en la Figura 2, correspondiente a la marea baja, el agua de mar entra en el recinto a través de las EAM y, simultáneamente, el aire es expulsado al exterior a través de la EAA. Esta situación se mantiene mientras la marea no comienza a subir.

A partir de las 12:27 h se cierra la entrada/salida de aire atmosférico (EAC). Mientras el nivel de la marea aumenta en el exterior del recinto, en su interior el agua permanece en el nivel definido como nivel de marea baja (Figura 3).

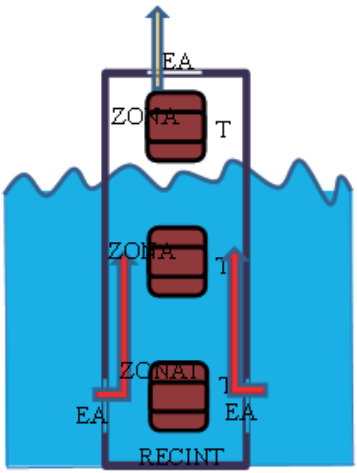
Figura 3. Recinto con la entrada/salida de aire cerrada durante el ascenso de la marea.



Esta situación puede mantenerse hasta las 15:43 h, punto establecido como nivel de marea alta. En ese momento se abre la entrada/salida de aire (EAA), permitiendo la salida del aire atmosférico almacenado en el recinto y la subida del nivel del agua de mar en su interior.

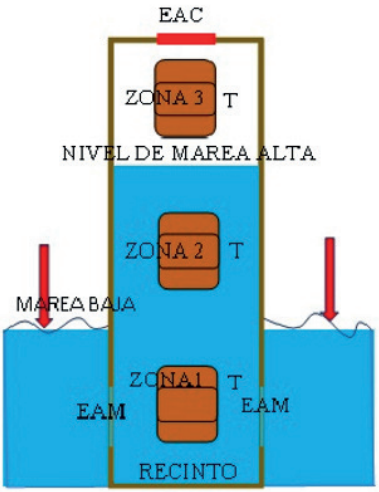
La salida de aire y la entrada de agua de mar se regulan de manera que el nivel interior alcance progresivamente el nivel definido como marea alta hasta las 18:43 h (Figura 4).

Figura 4. Entrada de agua de mar y salida de aire durante el ascenso del nivel interior.



En este punto, la marea exterior ya se encuentra descendiendo, proceso iniciado a las 17:13 h. Se cierra entonces la entrada/salida de aire atmosférico del recinto. De este modo, mientras la marea continúa bajando en el exterior, el nivel del agua de mar en el interior permanece en el nivel definido como marea alta (Figura 5).

Figura 5. Mantenimiento del nivel de marea alta en el interior durante el descenso de la marea exterior.

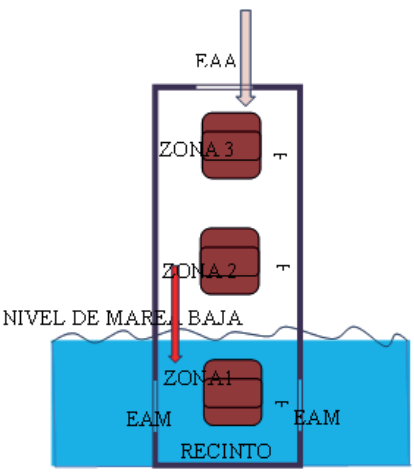


Esta situación se mantiene hasta las 21:57 h, cuando la marea exterior alcanza nuevamente el nivel definido como marea baja. Durante este período, el nivel del agua de mar en el interior del recinto permanece en el nivel de marea alta mientras la marea exterior desciende.

A partir de las 21:57 h se abre la entrada de aire al recinto y se regula su flujo para que el nivel del agua de mar en el interior descienda progresivamente. Este proceso continúa hasta las 24:57 h, momento en el que el nivel interior alcanza el nivel definido como marea baja. Para entonces, la marea exterior ya habrá comenzado nuevamente a subir.

A las 24:57 h se cierra la entrada de aire atmosférico al recinto y comienza nuevamente el ciclo (Figura 6).

Figura 6. Finalización del ciclo y retorno al nivel de marea baja en el interior del recinto.



De este modo, durante el funcionamiento del sistema se distinguen las siguientes situaciones:

a. Nivel de marea baja exterior y cierre de la salida de aire al exterior

Se mantiene en el interior del recinto el nivel establecido como marea baja mientras el nivel de la marea aumenta en el exterior. Durante esta fase no se produce movimiento de agua ni de aire en el interior y, por tanto, no se realiza trabajo.

La presión interior del agua sobre el aire pasa de la presión atmosférica a la correspondiente a la diferencia de altura entre los niveles de agua y aumenta progresivamente hasta alcanzar la diferencia entre los niveles de marea alta y marea baja. El volumen de aire se mantiene aproximadamente constante, mientras que su temperatura interna debería aumentar ligeramente, incrementando su energía interna.

b. Apertura de la salida de aire del recinto al exterior

Una vez abierta la salida de aire, el agua comienza a subir en el interior del recinto hasta alcanzar el nivel establecido como marea alta, ligeramente inferior al nivel de la marea alta exterior. Durante este proceso, el aire sale al exterior mientras el agua ocupa progresivamente su lugar.

La presión del aire en el interior disminuye hasta alcanzar la presión atmosférica. En esta fase se produce movimiento tanto de agua como de aire y, por tanto, ambos fluidos realizan trabajo.

c. Cierre de la salida de aire del recinto al exterior

La salida de aire se cierra cuando el agua en el interior del recinto alcanza el nivel establecido como marea alta. A partir de este momento, no se produce movimiento de agua ni de aire en el interior y, por tanto, no se realiza trabajo.

Mientras tanto, el nivel de la marea exterior disminuye progresivamente hasta alcanzar el nivel de marea baja.

d. Apertura de la entrada de aire al recinto

Al abrir la entrada de aire al recinto, el nivel del agua en su interior comienza a descender hasta alcanzar el nivel establecido como marea baja. Durante este proceso se produce un desplazamiento simultáneo de agua y aire, y la presión del aire en el interior se iguala progresivamente con la presión atmosférica.

El movimiento de ambos fluidos permite la realización de trabajo hasta que el nivel de la superficie interior del agua alcanza el nivel establecido como marea baja. En ese momento se cierra nuevamente la entrada de aire al recinto.

El nivel de marea baja se establece aproximadamente una hora y media antes del punto real de bajamar y se mantiene hasta aproximadamente una hora y media después. De manera análoga, el nivel de marea alta se establece aproximadamente una hora y media antes del punto real de pleamar y se mantiene hasta aproximadamente una hora y media después.

3. APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA POTENCIAL DE LAS MAREAS Y RESONANCIA

En el aprovechamiento actual de la energía de las mareas se utiliza tanto la energía potencial ($E_p = mgh$), almacenada por una masa de agua de mar como consecuencia de la diferencia de nivel entre la pleamar y la bajamar, como la energía cinética ($E_c = 1/2mv^2$), desarrollada, por ejemplo, por las corrientes marinas. Estas últimas se producen, en gran medida, por el incremento de la velocidad del agua del mar al disminuir la sección por la que se desplaza, de acuerdo con la ecuación de continuidad de la mecánica de fluidos.

En este estudio se considera específicamente el aprovechamiento de la **energía potencial**.

El sistema actual, con sus diferentes variantes, consiste en embalsar a cielo abierto el agua del mar, de manera semejante a lo que ocurre en las centrales hidroeléctricas. En este caso, la altura disponible se encuentra muy limitada por la diferencia de nivel existente entre la bajamar y la pleamar, aunque puede disponerse de una gran cantidad de agua embalsada.

Las mayores diferencias de nivel se registran en la bahía de Fundy, Canadá. Otro caso de aprovechamiento de la energía potencial de las mareas se encuentra en el estuario del río Rance, en Francia (Figura 7).

Figura 7. Aprovechamiento de la energía potencial de las mareas en el estuario del río Rance, Francia. Fuente: Manuel Lara Coira, La Energía del Mar.



Estas mareas excepcionales se producen por fenómenos de resonancia de amplitud, como consecuencia de la relación entre el período de la marea –o alguno de sus armónicos– y las características de la cuenca, rada, dársena u otro espacio en el que se produce el movimiento del agua.

A continuación, se realiza una primera aproximación al caso de la desembocadura del río Rance, en Saint-Malo, con el propósito de analizar su comportamiento respecto a la resonancia. Para ello, se idealiza la desembocadura como una dársena y se toman como referencia sus dimensiones aproximadas.

Los datos utilizados se obtienen de la carta de navegación representada en la Figura 8.

Figura 8. Carta de navegación de la zona de Saint-Malo utilizada para obtener los datos de referencia.



En la Figura 8 se indica que la profundidad está expresada en metros y que la escala de la carta es 1:15.000.

Para el análisis de la resonancia en sistemas hidrodinámicos se toma como referencia el trabajo de Palomino, Arrayás y Almazán sobre oscilaciones en masas de agua confinadas. En dicho trabajo se utiliza la tabla de corrección de Merian para calcular períodos en masas de agua confinadas en dársenas en función de la relación entre su ancho y su longitud.

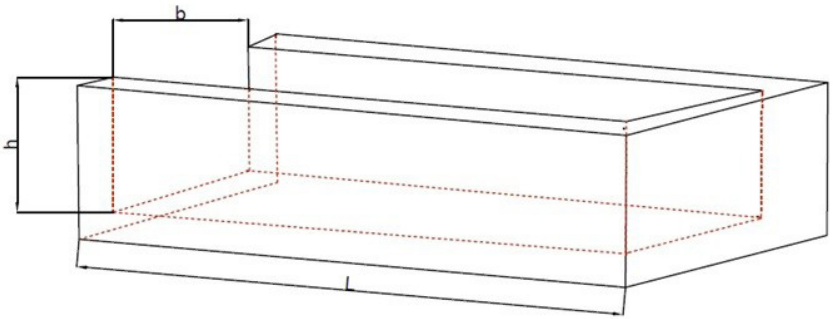
$$\frac{b}{L} = \frac{Ancho\ de\ la\ Dársena}{Longitud\ de\ la\ Dársena}$$

Luego utilizan la Tabla de Corrección que Diseña Merian para calcular Períodos en Masas de Agua Confinadas en Dársenas según la relación entre Ancho y Longitud

Tabla 1. Factores de corrección en función de la relación entre ancho y longitud.

Relación b/L	b/L = 1	b/L = 1/2	b/L = 1/3	b/L = 1/4	b/L = 1/5	b/L = 1/10	b/L = 1/20
Factor de Corrección	1,371	1,297	1,240	1,203	1,176	1,110	1,060

Figura 9. Representación idealizada de la desembocadura del río Rance como una dársena.



La figura 9 anterior representaría una Dársena que Idealizase la Desembocadura del Río Rance (Saint Malo-Francia):

b=Ancho de la bocana de la Dársena enfrentada, al mar

L=Longitud de la Dársena

h=Profundidad constante de la Dársena (tomamos la más profunda de la carta)

Para una primera aproximación en la Desembocadura del río Rance, la consideramos así, como una Dársena

b=4 km L=10 km h=11,7 m (tomado de esa carta de navegación)

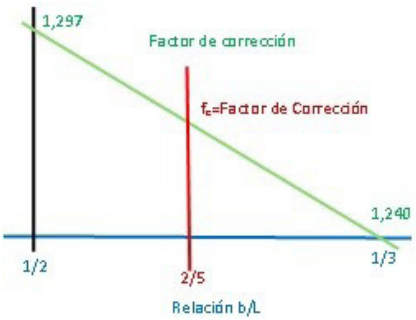
Aplicaríamos la fórmula de Merian para el Período de Resonancia

$$T = f_c \frac{4L}{m\sqrt{gh}}$$

$$f_c = Factor\ de\ Corrección, \qquad m = masa\ (tomamos\ 1kg)$$

b/L = 4000/10000 = 0,4

Extrapolando:



$$\frac{1{,}297 - 1{,}240}{\frac{1}{2} - \frac{1}{3}} = \frac{1{,}297 - f_c}{\frac{1}{2} - \frac{2}{5}}$$

De esta nos resulta;

$$f_c = 1{,}2578$$

Así tendríamos

$$T = f_c \frac{4L}{m\sqrt{hg}} = 1{,}2578 \frac{4.4000m}{1.\sqrt{11{,}7m10\frac{m}{s^2}}} = 1860s = 1860s\frac{1hora}{3600s} = 0{,}5168horas$$
$$\cong 0{,}517horas$$

Si tenemos en cuenta que el Período de Marea en la zona de la Desembocadura del Río Rance es de: 12horas, 25minutos

$$Período\ en\ las\ Coordenadas\ del\ lugar = 12horas\ y\ 25\ minutos \cong 12{,}41\ horas$$

¿Se corresponde el Período de la Desembocadura del Río Rance, con algún Armónico del Período de Marea de la Zona?...

Comprobamos:

$$\frac{12{,}41horas}{0{,}517horas} \cong 24$$

Se correspondería aproximadamente con el armónico de orden 24 del período de marea de la zona de Saint-Malo.

Los datos obtenidos de la carta de navegación son aproximados y presentan un grado de precisión que podría mejorarse considerablemente. No obstante, esta primera aproximación permite plantear la posibilidad de emular determinadas condiciones presentes en la naturaleza con el objetivo de favorecer el aprovechamiento de la energía de las mareas.

Aunque las obras civiles necesarias podrían resultar costosas, las propuestas planteadas constituyen dos posibles alternativas para ampliar el aprovechamiento de la gran cantidad de energía disponible en el mar.

Como continuación de esta propuesta, en un próximo trabajo se pretende analizar la aplicación del sistema aire-agua al aprovechamiento de la subida del nivel del agua en embalses hidroeléctricos para la generación de energía eléctrica, considerando que, en los sistemas convencionales, el aprovechamiento energético se produce fundamentalmente durante la caída del agua.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo plantea una alternativa para ampliar el aprovechamiento de la energía de las mareas mediante la utilización conjunta del agua de mar y del aire atmosférico. La propuesta se basa en el confinamiento de ambos fluidos en un recinto cerrado, de manera que los desplazamientos producidos durante las variaciones del nivel de la marea puedan ser utilizados para accionar turbinas destinadas a la generación de energía eléctrica.

El análisis del ciclo de funcionamiento permite describir diferentes fases de entrada y salida de agua y aire, asociadas a los períodos de pleamar y bajamar. De este modo, la propuesta busca aprovechar no solo el movimiento y la energía potencial de la masa de agua, sino también el desplazamiento del aire generado por las variaciones de su nivel dentro del recinto.

Asimismo, el análisis realizado sobre el fenómeno de resonancia pone de manifiesto el interés de considerar las características geométricas de determinados espacios costeros en el estudio del aprovechamiento de la energía de las mareas. La aproximación realizada para la desembocadura del río Rance, a partir de datos obtenidos de una carta de navegación, presenta limitaciones derivadas del carácter aproximado de dichos datos y requiere estudios de mayor precisión. No obstante, permite plantear la posibilidad de reproducir determinadas condiciones observadas en la naturaleza para favorecer el aprovechamiento energético de las mareas.

Aunque la implementación de sistemas de estas características podría requerir obras civiles de considerable envergadura, las ideas desarrolladas en este trabajo constituyen una propuesta conceptual cuyo comportamiento y viabilidad deberán ser analizados con mayor profundidad mediante estudios posteriores.

Como posible línea de continuidad, se plantea estudiar la aplicación del sistema aire-agua en embalses hidroeléctricos, con el objetivo de analizar la posibilidad de aprovechar también el ascenso del nivel del agua para la generación de energía eléctrica, complementando el aprovechamiento convencional asociado a su caída.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a sus directores:

Director de Programa:

Dr. Álvaro Baaliña Insua.

Directores de Tesis:

Dr. José Luis Calvo Rolle;

Dr. José Luis Casteleiro Roca;

Dr. Francisco Zayas Gato.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Palomino Monzón, M. C., Almazán Gárate, J. L., & Arrayás González, J. L. (s. f.). **Oscilaciones en masas de agua confinadas: resonancia en puertos**. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

CAPÍTULO 9

EXPOSICIÓN A HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS POR EL USO DE LEÑA EN LA COMUNIDAD LA MARCELA, MIQUIHUANA, TAMAULIPAS

Data de submissão: 25/08/2026
Data de aceite: 10/09/2026

Lorenzo Heyer Rodríguez
Universidad Autónoma de Tamaulipas
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Cd. Victoria, Tamaulipas México
https://orcid.org/0000-0002-7191-602X

Valeria Navarro López
Universidad Autónoma de Tamaulipas
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Cd. Victoria, Tamaulipas México
https://orcid.org/0009-0003-4272-1770

Bárbara Azucena Hernández Macias
Universidad Autónoma de Tamaulipas
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Cd. Victoria, Tamaulipas México
https://orcid.org/0000-0001-8196-6496

Elizabeth del Carmen Andrade Limas
Universidad Autónoma de Tamaulipas
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Cd. Victoria, Tamaulipas México
https://orcid.org/0000-0001-8240-6060

Jacinto Treviño Carreón
Universidad Autónoma de Tamaulipas
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Cd. Victoria, Tamaulipas México
https://orcid.org/0000-0001-7945-4010

RESUMEN: La combustión de biomasa emite hidrocarburos policíclicos aromáticos (HAP) que representan un riesgo potencial para la salud debido a que son agentes cancerígenos y mutagénicos. Este estudio tuvo como objetivo determinar la exposición a HAP de los habitantes de la comunidad de La Marcela, en el municipio de Miquihuana, Tamaulipas, debido al uso de biomasa como fuente de energía. Con este fin, se llevó a cabo la identificación de las especies de leña utilizadas como fuente de energía y se determinó su emisión de HAP. Asimismo, la concentración de HAP en el aire interior de cuatro viviendas de la comunidad se determinó en tres campañas de muestreo. Las especies identificadas como fuentes de energía en la comunidad de La Marcela fueron: Pino (*Pinus pseudostrobus*), Roble (*Quercus mexicana*) y Madroño (*Arbuto xalapensis)*, que tenían una emisión media de 0.194 mg de HAPs totales/kg peso seco, observándose diferencias en cuanto al tipo y la cantidad de HAPs emitidos. En el humo de la madera de Pino y Madroño se detectó la presencia de benzo(a)pireno, que pertenece al grupo 1 de la clasificación cancerígena de la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer. La concentración media de HAP encontrada en el aire interior de las viviendas fue de 856,91 ng/m^3, detectando la presencia de 28 HAP. Los habitantes de La Marcela están expuestos a los HAP debido a la combustión de biomasa como fuente de energía, siendo la madera de roble la más

adecuada para su uso, ya que tiene una menor emisión total de HAP y no contiene agentes carcinogénicos del grupo 1.
PALABRAS CLAVE: contaminación; aire interior; Benzo(a)pireno.

EXPOSURE TO POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS FROM THE USE OF FIREWOOD IN THE COMMUNITY OF LA MARCELA, MIQUIHUANA, TAMAULIPAS

ABSTRACT: The combustion of biomass emits Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) which represent a potential health risk because they are carcinogenic and mutagenic agents. This study aimed to determine the exposure to PAHs of the inhabitants of the community of La Marcela in the municipality of Miquihuana, Tamaulipas, due to the use of biomass as an energy source. To this end, the identification of the species of firewood used as an energy source was carried out and their emission of PAHs was determined. Likewise, the concentration of PAHs in indoor air of four houses in the community was determined in three sampling campaigns. The species identified as energy sources in the community of La Marcela were: Pine (Pinus pseudostrobus), Oak (Quercus mexicana) and Madroño (Arbutus xalapensis), which had an average emission of 0.194 mg total PAHs/kg dry weight, with differences observed in terms of type and quantity of PAHs emitted. In the smoke from the wood of Pine and Madroño, the presence of Benzo(a)pyrene was detected, which belongs to group 1 of the carcinogenic classification of the International Agency for Research on Cancer. The average concentration of PAHs found in the indoor air of the dwellings was 856.91 ng/m^3, detecting the presence of 28 PAHs. The inhabitants of La Marcela are exposed to PAHs due to the burning of biomass as an energy source, with oak wood being the most suitable for use since it has a lower emission of total PAHs and does not contain group 1 agents of carcinogenicity.
KEYWORDS: pollution; indoor air; Benzo(a)pyrene.

1. INTRODUCCIÓN

En el año 2021 se estimó que un tercio de la población mundial utilizaba tecnologías y combustibles contaminantes para cocinar (WHO, 2023a). Entre estos combustibles se encuentra la biomasa principalmente en forma de leña, la cual es utilizada para cocción de alimentos y calefacción en áreas rurales y suburbanas con nivel socioeconómico bajo, debido a su bajo costo y disponibilidad, en comparación con la electricidad y el gas licuado, además de ser un factor cultural arraigado (Hernández-Goruño et al., 2017).

En los hogares de zonas rurales se utilizan fogones abiertos poco eficientes y contaminantes para la quema de leña (Quiroz Carranza *et al.*, 2010). Las emisiones de gases y humos de estos fogones producidos por la combustión incompleta de la leña degradan la calidad del aire dentro de las viviendas poniendo en riesgo la salud de los habitantes, Entre los principales contaminantes emitidos por la quema de leña se encuentran: material particulado fino, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno,

hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), compuestos orgánicos volátiles (COVs) y carbón negro (CN) (Ni *et al*., 2016).

La exposición a los gases de combustión de la leña está asociada con enfermedades como neumonía infantil, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, cáncer de pulmón, cataratas y tuberculosis (Aung et al., 2016; Kochi et al., 2017). También se ha observado que las mujeres expuestas de manera crónica a la contaminación del aire interior de las viviendas son propensas a padecer la enfermedad denominada "pulmón de cabaña" (hut lung), la cual se caracteriza por producir fibrosis, inflamación y depósitos de polvo y carbón en los pulmones (Rennet et al., 2014). Se estima que a nivel mundial, el uso de leña para cocinar es responsable de 3.2 millones de muertes (WHO, 2022).

En México hay 26.8 millones de personas que viven en comunidades rurales (INEGI, 2021) de las cuales el 72.3 % utiliza biomasa como fuente de energía (WHO, 2023b). En el año 2022 se atribuyeron 21 639 muertes a causa de la contaminación del aire interior de las viviendas, de estas el 47.1 % fueron debido a enfermedad cardiaca isquémica, 17.5 % por infección en vías respiratorias, 17.3 % por enfermedad pulmonar obstructiva crónica, 13.8 % por apoplejía y 4.2 % por cáncer de vías respiratorias y pulmón (WHO, 2023c). Además, en el año 2019 se registraron 3 690 casos de cataratas asociados a contaminación de aire interior (WHO, 2023d).

De los contaminantes del aire interior de las casas los HAP toman especial interés, por estar asociado al material particulado menor a 2.5 micras ($PM_{2.5}$) (Muránszky et al., 2011) y a que algunos de ellos son considerados mutagénicos y/o carcinogénicos (IARC, 2010; White y Sandler 2017), sin embargo, existe un desconocimiento generalizado sobre la exposición a estos contaminantes emitidos por la quema de leña en el interior de las viviendas (Jiang y Bell, 2008; Wu et al., 2015).

Por lo que este estudio se propuso identificar las especies leñosas utilizadas en la comunidad de la Marcela del municipio de Miquihuana, Tamaulipas, como combustible y obtener su perfil de emisión de HAP durante su combustión y determinar la exposición de los pobladores del ejido la Marcela a estos contaminantes del aire interior de sus viviendas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. SITIO DE ESTUDIO

El estudio se realizó en la comunidad rural La Marcela en el municipio de Miquihuana, Tamaulipas, México. Esta comunidad se encuentra en un valle a 65 kilómetros de la cabecera municipal, a una altitud de 2 500 msnm, la vegetación predominante es

el bosque de pino-encino con matorral rosetófilo de *Agave gentryi* (Castillo-Hernández y Treviño-Carreón, 2014). Su población es de 70 habitantes agrupadas en 18 familias. Las viviendas cuentan en promedio con tres habitaciones y carecen de servicios básicos como drenaje y piso firme, están hechas de madera y adobe con techos de palma de soyate (*Brahea ducis*) o de lámina. En el 100 % de los hogares de esta comunidad se utilizan fogones tradicionales para cocinar.

2.2. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA

Se tomaron muestras de leña utilizada en las casas de la comunidad, identificándose las especies utilizadas como fuente de energía. A cada una de las especies identificadas se les determino el contenido de humedad, materia seca y materia volátil, mediante los procedimientos ASTM E871 y ASTM E872, y se determinó el perfil de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) que emiten en el humo de las especies utilizadas como leña, para ello se realizó la combustión de 5 g de cada una de las especies identificadas como fuentes de energía bajo condiciones de fogón abierto y los gases emitidos fueron colectados con un embudo de vidrio de 30 cm de diámetro colocado por encima del material de combustión, el cual fue conectado a un tren de muestreo utilizando como elemento retenedor un filtro de cuarzo de 47 mm (PallflexR TissuquartzTM) y una bomba aspiradora (Supelco), con un flujo de 2.0 L/min durante 10 minutos. Posteriormente los filtros fueron analizados para determinar la concentración de HAP mediante cromatografía de gases. Se llevaron a cabo tres repeticiones para cada tipo de madera.

2.3. MUESTREO DE AIRE INTERIOR

Como criterio de inclusión para el estudio se eligieron aquellas viviendas donde los habitantes reportaron su ocupación permanente en una encuesta socioeconómica que se aplicó a las amas de casa.

Se colecto el polvo y humo del aire interior de las casas habitación seleccionadas con un filtro de cuarzo de 47 mm (Pallflex^{R} Tissuquartz^{TM}), estos filtros fueron acondicionados y pesados a temperatura ambiente en el laboratorio y colocado en bolsas plásticas hasta su uso. Los filtros fueron utilizados como elemento retenedor en un tren de muestreo, colocándolos en un porta filtro a una altura de 1.1 m en el lado derecho de la cocina, el cual fue conectado a una bomba de aspiración (Supelco), con un flujo de 2.0 L/min.

El tiempo de muestreo fue de 24 horas, registrándose la temperatura y la humedad de la zona de la cocina con un dispositivo EASY LOG EL-USB-2 (Lascar Electronics, Erie, PA, United States). Al termino de este tiempo los filtros fueron colocados en bolsas de plástico y transportadas al laboratorio en refrigeración con hielo seco. En el laboratorio los filtros se pesaron nuevamente y fueron almacenadas en un congelador a -10 °C hasta su análisis para determinar HAP.

Se realizaron tres campañas de muestreo, invierno (noviembre), primavera (marzo y mayo) y verano (agosto y septiembre).

2.4. ANÁLISIS HAP

Las muestras colectadas se analizaron en los laboratorios de Especiación Química de Aerosoles Orgánicos Atmosféricos del Centro de Ciencias Atmosféricas de la Universidad Nacional Autónoma de México. Los filtros fueron pesados y posteriormente se sometieron a extracción asistida por ultrasonido (UAE-MSC) con diclorometano (Banjoo y Nelson, 2005). Los extractos se analizaron por cromatografía de gases / espectrometría de masas en química negativa (GC / MS-NCI) (Beristain-Montiel, E. et al., 2016). El análisis cromatográfico se llevó a cabo en un GC- MS Agilent 6890N/5973 con una columna cromatográfica DB-35 (35%(Phenyl) methylpolysiloxane) de 60 m longitud, 0.25 mm de diámetro interior y 0.25 m grosor de película (Agilent J&W, Santa Clara California, USA). El gas acarreador fue helio (99.998 %, Infra, México), a un flujo de 1.2 mL/min. Se inyectó 1 µL en splitless a 250 °C. La temperatura del horno fue de 40°C por 1 min, primer incremento a 110 °C con una tasa de 50 °C/min, segundo incremento a 335 °C durante 17. 4 min con una tasa de 20 °C/min.

2.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis de los resultados se realizó con el programa estadístico RStudio 2024.04.1 (Posit Software, PBC). A los resultados se aplicaron las pruebas de Shapiro Wilks y Levene para determinar su normalidad y homogeneidad de varianza. Posteriormente se realizó la comparación de las de concentración de HAP totales mediante la prueba H de Kruskal-Wallis y la comparación de perfiles de HAP mediante la prueba de Friedman y comparación post-hoc mediante la prueba de rangos con signo de Wilcoxon. Para la comparación de perfiles de HAP de aire interior y los experimentos de combustión de madera, se obtuvieron las concentraciones relativas de los HAP y posteriormente se compararon mediante la prueba de los signos.

Cuadro I. Caracterización de la biomasa utilizada en el ejido Marcela como fuente de energía

Especie	% Humedad	% Materia seca	% Material volátil	HAP Totales mg/Kg peso seco
Pino (*Pinus pseudostrobus*)	8.29	91.72	2.12	0.224 ± 0.331
Encino (*Quercus mexicana*)	5.17	94.83	7.31	0.127 ± 0.130
Madroño (*Arbutus xalapensis*)	4.66	95.34	0.21	0.233 ± 0.365

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA

El **cuadro I** muestra los resultados de la caracterización de la madera que se utilizan en la comunidad como fuente de energía, en la **figura 1** se presenta el dispositivo utilizado para la colecta del humo emitido durante la combustión de la madera.

De acuerdo con la población de la Marcela, la madera de pino es utilizada para calefacción, ya que produce mayor flama y proporciona mayor calor, sin embargo, también es la que produce mayor cantidad de humo.

Figura 1. Colecta de gases emitidos durante la combustión de madera para la determinación del contenido de HAP de la biomasa utilizada como fuente de energía en la comunidad La Marcela, Miquihuana, Tamaulipas.

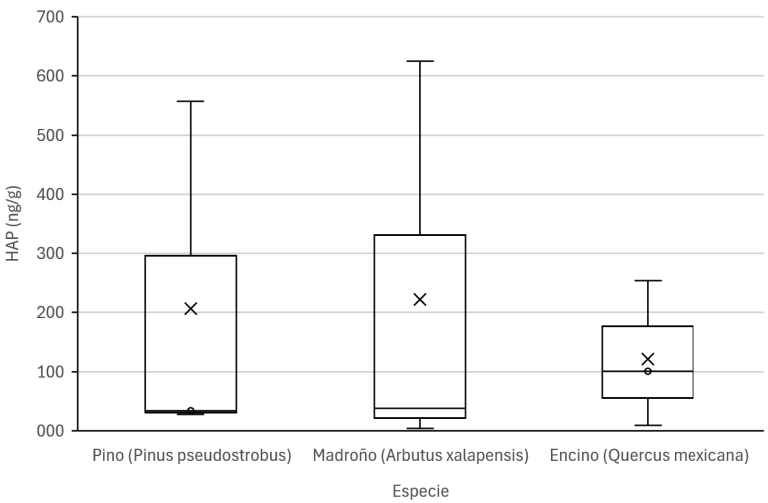


La madera del encino es utilizada para cocinar alimentos, ya que el fogón con este tipo de maderas permanece por mayor tiempo encendido, esto corresponde a lo señalado por Contreras-Hinojosa (2003) de que se prefieren las maderas de esta especie,

ya que sus brasas duran más, producen más calor y emiten menos humo. Además, los pobladores indican que utilizan el madroño como un iniciador de fuego ya que es una madera que enciende rápidamente.

La emisión promedio de HAP totales de las maderas utilizadas en la comunidad de la Marcela fue de 0.194 ± 0.275 mg HAP/Kg peso seco, no encontrándose diferencias significativas en la emisión de HAP entre las especies (p = 1, Kruskal'Wallis), **figura 2**, cabría señalar que las concentraciones de pino y madroño son muy similares, mientras que encino presenta una menor concentración, pero debido a la alta variabilidad de las concentraciones y bajo número muestras puede faltar poder estadístico para encontrar diferencias entre ellas.

Figura 2. Comparación del contenido de HAP totales en las maderas utilizadas como fuente de energía en la comunidad La Marcela, Miquihuana, Tamaulipas.

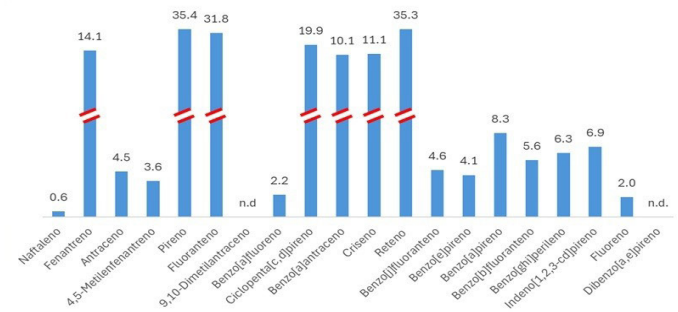


Las emisiones de HAP total por las maderas usadas como biocombustible en la Marcela es menor a la reportadas por Eriksson *et al.* (2014) de 1.5 mg/Kg para troncos de abedul (*Betula pendula)* y < 2 mg/Kg para pellets de una mezcla de pino y abeto en estufas bajo condiciones de tasa nominal de combustión (1.9 kg/h). Nielsen *et al.* (2017) señalan que la emisión de HAP se ve afectada por las condiciones de la combustión como es la carga, el flujo de aire y humedad, factores que determinan la velocidad de combustión, de tal forma que al aumentar la taza de combustión se incrementa la emisión de HAP debido a la disminución de la disponibilidad de oxígeno.

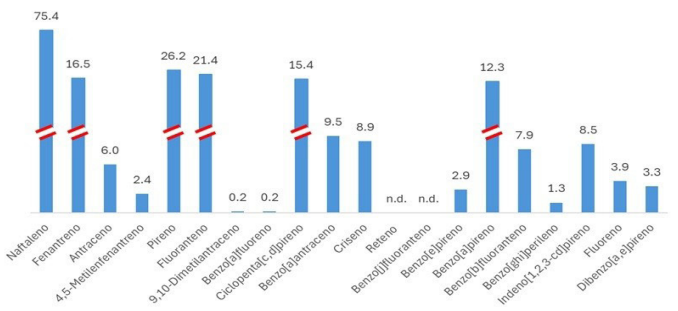
El perfil de HAP emitidos por la combustión de los tres tipos de madera utilizados en el ejido La Marcela como fuentes de energía, se muestran en la **figura 3**. Se encontró una diferencia entre los perfiles de HAP obtenidos para cada tipo de madera (p = 0.005,

Friedman), encontrándose que la madera de encino presento un perfil diferente (p = 0.025, Wilcoxon) con respecto a la madera del pino y madroño, las cuales no mostraron diferencia entre sus perfiles de HAP (p = 0.45, Wilcoxon). Esto concuerda con lo señalado por Daly (2007) y Chrysikou (2008) los cuales mencionan que, dependiendo de la temperatura de combustión, duración del proceso, las condiciones de la flama (oxígeno) y del tipo de material orgánico se obtienen perfiles de HAP diferentes.

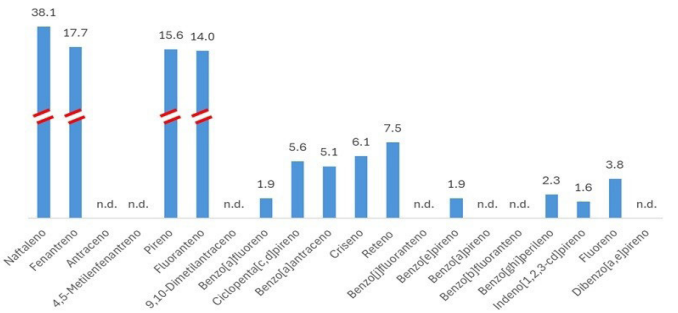
Figura 3. Concentración promedio (ng/g) de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos presentes en la emisión de combustión de maderas utilizadas como fuente de energía en la comunidad La Marcela, Miquihuana, Tamaulipas.



(a) Pino (Pinus pseudostrobus)



(b) Madroño (Arbutus xalapensis)



(c) Encino (Quercus mexicana)

Se detectó la presencia de 20 HAP, en el **cuadro II** se muestran las características químicas y toxicológicas de cada uno de ellos. En el humo de la madera de Pino y Madroño se detectó la presencia de Benzo(a)pireno, el cual pertenece al grupo 1 de la clasificación carcinogénica de la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) por lo que se considera carcinogénico para el humano. Se detectó en la madera de las tres especies HAP clasificados dentro de los grupos 2A y 2B de la clasificación carcinogénica de la IARC, siendo el Ciclopenta[c,d] pireno considerado como probablemente carcinógeno para el ser humano, y Naftaleno, Benzo[a]antraceno, Criseno y Indeno[1,2,3-c,d]pireno considerados posiblemente carcinógenos para el ser humano. El resto de los HAP detectados pertenecen al grupo 3 de la clasificación carcinogénica del IARC o no han sido clasificados, por lo que no hay pruebas suficientes de que los HAP de este grupo cause cáncer a los humanos, sin embargo, el Dibenzo[a,e]pireno, Benzo[ghi]perileno, Dibenzo[a,c]antraceno son considerados genotóxicos.

En las emisiones de la madera de pino se encontraron dieciocho de los veintinueve HAP analizados, con las concentraciones más altas para el Reteno, Pireno y Fluoranteno y fue la única en que se detectó la presencia de Benzo[j]fluoranteno. El Reteno es un marcador molecular de la combustión de madera (Ramdahl, 1983) y es considerado característico de la combustión de madera pino ya que se forma principalmente por la degradación térmica del ácido abiético presente en la madera de coníferas (Shen et al., 2012).

Cuadro II. Características de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos encontrados en el aire interior de casas habitación y las emisiones de maderas usadas como fuente de energía en la Comunidad La Marcela, Miquihuana, Tamaulipas.

Compuesto	**Abreviatura**	**Peso molecular (g mol^{-1})**	**No. de Anillos**	**Carcinogenicidad***	**Genotoxicidad****
Naftaleno	Nap	128.2	2	2B	No
Acenafteno	Ace	154.2	3	3	NC
Fluoreno	Flu	166.2	3	3	NC
Fenantreno	Phe	178.2	3	3	NC
Antraceno	Ant	178.2	3	3	No
2-Metilantraceno	2Man	192.3	3	NC	NC
1-Metilantraceno	1Man	192.3	3	NC	NC
4,5-Metilenfenantreno	[4,5]Mp	192.3	3	NC	NC
3,6-Dimetilfenantreno	Dmp	206.3	3	NC	NC

Compuesto	Abreviatura	Peso molecular (g mol^{-1})	No. de Anillos	Carcinogenicidad*	Genotoxicidad**
Fluoranteno	Fla	202.3	4	3	NC
9,10-Dimetilantraceno	DPA	206.3	3	NC	NC
Pireno	Pyr	202.3	4	3	No
Reteno	Ret	234.3	3	NC	NC
Benzo[a]fluoreno	B[a]F	216.3	4	3	No
Benzo[a]antraceno	B[a]A	228.3	4	2B	Si
Trifenileno	Tri	228.3	4	NC	NC
Criseno	Cry	228.3	4	2B	Si
Ciclopenta[c,d]pireno	CPP	226.3	5	2A	Si
Benzo[b]fluoranteno	B[b]F	252.3	4	2B	Si
Benzo[k]fluoranteno	B[k]F	252.3	4	2B	Si
Benzo[j]fluoranteno	B[j]F	252.3	5	2B	Si
Benzo[e]pireno	B[e]P	252.3	5	3	NC
Benzo[a]pireno	B[a]P	252.3	5	1	Si
Dibenzo[a,h] antraceno	D[a,c]A	278.4	5	2A	Si
Dibenzo[a,c] antraceno	D[a,c]A	278.4	5	3	NC
Indeno[1,2,3-cd] pireno	Ind	276.3	6	2B	NC
Benzo[ghi]perileno	B[ghi]P	276.3	6	3	Si
Dibenzo[a,h]pireno	D[a,h]P	302.4	6	2B	NC
Dibenzo[a,e]pireno	D[a,e]P	302.4	6	3	Si

*Clasificación IARC, 2010. Grupo 1 Carcinogénico para el ser humano, Grupo 2A Probable carcinogénico para el ser humano, Grupo 2B Posible carcinogénico para el ser humano, Grupo 3 evidencia limitada con respecto a su carcinogenicidad para el ser humano, NC no se ha clasificado.

** Opinion of the Scientific Committee on Food on the Risk to human health of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food (SCF, 2002). NC datos insuficientes o contradictorios para su clasificación genotóxica.

Las emisiones de encino registraron trece HAP, presentando la más baja concentración de los HAP detectados con excepción del Fenantreno que fue la concentración más alta de las tres maderas estudiadas, no se detectó la presencia de Antraceno, 4,5-Metilenfenantreno, 9,10-Dimetilantraceno, Benzo[b]fluoranteno, Benzo[j]fluoranteno, Dibenzo[a,e]pireno, y Benzo[a]pireno, de tal forma que las emisiones del encino son las que tiene menos agentes carcinogénicos de las

tres especies estudiadas. Por lo que el uso de madera de encino en los fogones representa una menor exposición a HAP y un menor riesgo a la salud por la ausencia del B[a]P.

En las emisiones de madera del madroño se detectaron dieciocho HAP, estando ausentes Reteno y Benzo[j]fluoranteno y fue la única en que se detectó Dibenzo[a,e] pireno, además presento la más alta concentración de Naftaleno.

En las tres especies estudiadas fueron detectados Naftaleno, Fluoreno, Fenantreno, Fluoranteno, Pireno, Benzo[a]fluoreno, Benzo[a]antraceno, Criseno, Indeno[1,2,3-c,d]pireno, Benzo[g,h,i,]perileno, Ciclopenta[c,d]pireno, Benzo[e]pireno, Indeno[1,2,3-cd]pireno y Benzo[ghi]perileno, la presencia de estos HAP ha sido reportada en otras maderas como el Roble (Rijal et al., 2005), Haya, Neem, Flamboyan, Acacia y Eucalipto (Malarut y Vangnai, 2018). Los compuestos con mayor masa molecular como fluoranteno, criseno y benzo[b]flouranteno se han reportado como dominantes durante la quema de biomasa (Xu et al., 2006; Wiriya et al., 2016).

3.2. MUESTREO DE AIRE INTERIOR

Fueron seleccionadas cuatro casas de la comunidad para realizar los muestreos de aire interior. Las casas seleccionadas presentan semejantes estilos de construcción y distribución, consistiendo en un cuarto con paredes de troncos, techo de palma a dos aguas, piso de tierra, con una puerta y sin ventanas. Así mismo utilizan el mismo tipo de fogón. En base a la encuesta socioeconómica aplicada se determinó que el lugar principal donde la familia pasaban el tiempo era la cocina, por lo que se seleccionó esta área para colocar el tren de muestreo, **figura 4**.

Las campañas de muestreo se realizaron en tres estaciones del año: primavera en los meses de marzo y mayo, verano durante los meses de agosto y septiembre e invierno en el mes de noviembre, obteniéndose un total de 18 muestras con dos muestras por casa para las campañas de primavera y verano, en la campaña de invierno solo se logró muestrear solo una casa por lo que solo se obtuvieron dos de seis muestras para esta temporada.

Figura 4. Muestreo de aire interior en casa habitación de la comunidad La Marcela, Miquihuana, Tamaulipas.



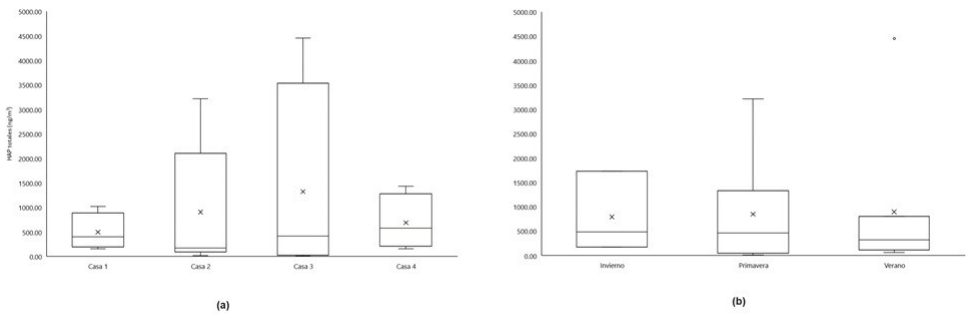
3.3. TEMPERATURA Y HUMEDAD AL INTERIOR DE LAS CASAS

No se observaron diferencias de temperatura entre las casas (p = 0.972, ANOVA) y las estaciones del año (p = 0.401, ANOVA), la temperatura promedio fue de 16.6 °C con mínima de 8 °C y máxima de 30 °C, la humedad relativa vario de 24.5 a 83.5 % con promedio de 60.5 %. La explicación de este comportamiento dentro de las casas puede estar relacionado a que los materiales y tipo de construcción similares.

3.4. CONCENTRACIÓN DE HAP EN AIRE INTERIOR

La concentración promedio de HAP totales encontrada en el interior de las casas de la comunidad La Marcela fue de 856.91 $\pm$ 1209.48 ng/m^3. La concentración promedio de los HAP entre las casas fue muy similar con una variabilidad muy alta, por lo que no se encontraron diferencias significativas (p = 0.91, Kruskal-Wallis), esto mismo se observa al hacer la comparación entre las estaciones del año (p = 0.80, Kruskal-Wallis), **figura 5**, sin embargo, en la campaña de invierno solo se logró muestrear una casa por lo que esto podría ser causa de un sesgo al comparar esta estación.

Figura 5. Comparación de la concentración de HAP totales en el interior de las casas de la comunidad La Marcela, Miquihuana, Tamaulipas, (a) comparación entre las casas y (b) entre las estaciones de muestreo.

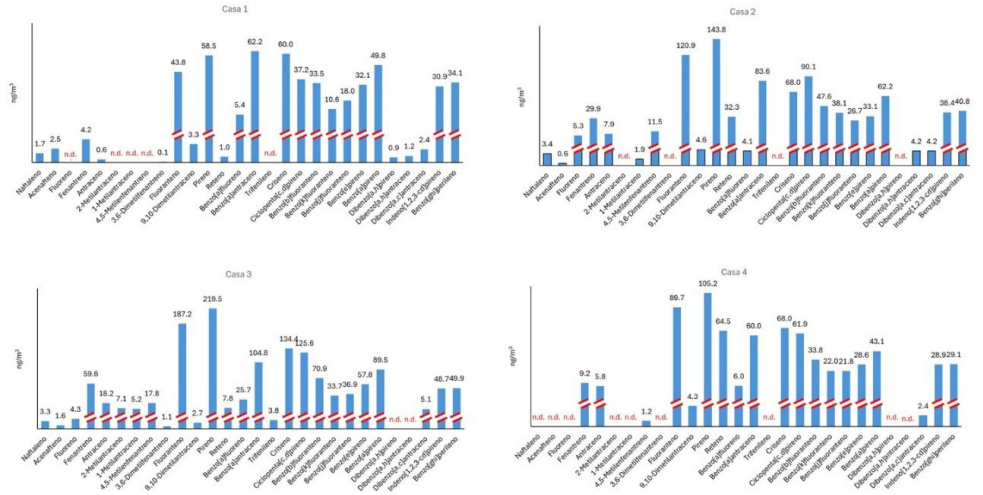


Estos valores son similares a los reportados por Duan et al. (2017), quienes realizaron muestreo en cocinas que utilizan biomasa para cocinar donde reportaron una concentración de 863 ng/m^3, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, menciona que los niveles de HAP en los hogares rurales de los países en desarrollo oscilan entre 100 y 10 000 ng/m^3 (Bhargava et al. 2004). Algunos investigadores han reportado variación en la cantidad y tipo de HAP con la época del año, reportando una mayor concentración durante el invierno comparado con el verano (Fuyong *et al.*, 2015; Ding *et al*., 2012; Duan *et al*., 2014), esto no se observó en nuestro estudio ya que las condiciones de temperatura y humedad dentro de las casas se mantuvo constante durante las campañas de muestreo.

Los principales componentes detectados fueron Fluoranteno, Pireno y Criseno, los cuales generan el 38.15 % de la masa total de HAP emitidos, lo cual concuerda con lo señalado en los Criterios de Salud Ambiental del Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas (IPCS, 1998), donde se menciona que los principales HAP encontrados en aire interior por quema de biomasa son los tres señalados anteriormente más el Fenantreno, que en nuestro estudio este último solo le correspondió el 3 % de la emisión total de HAP.

La **figura 6** muestra los perfiles de HAP para cada una de las casas muestreadas, encontrándose diferencias entre las casas en los perfiles de HAP ($p < 0.001$, Friedmann) siendo las casas con diferente perfil la 1 y 4 ($p = 0.19$, Wilcoxon), la diferencia entre estas dos casas podría estar relacionada con el tiempo de uso del fogón ya que acorde con la encuesta socioeconómica aplicada estas casas representan las casas con mayor y menor uso de los fogones respectivamente.

Figura 6. Perfil de hidrocarburos aromáticos policíclicos encontrados en el aire interior de casas habitación de la comunidad La Marcela en el Municipio de Miquihuana, Tamaulipas.



Se realizo una prueba de los signos para comparar la concentración relativa de HAP encontrados en el aire interior y los emitidos en el experimento de laboratorio de combustión de madera, **cuadro III**, no encontrando diferencias en las casas 1, 3 y 4 ($p > 0.01$, prueba de los Signos). En la casa 2 se observó una diferencia entre el aire interior y las maderas de madroño y encino ($p<1$).

Cuadro III. Resultado de la prueba de los signos para la comparación de concentraciones relativas de HAP entre aire interior de las casas de Miquihuana, Tamaulipas y los HAP emitidos por combustión de madera.

	Pino	Madroño	Encino
Casa 1	0.054	0.014	0.032
Casa 2	0.076	0.002*	0.003*
Casa 3	0.575	0.500	0.014
Casa 4	0.076	0.011	0.014

*diferencia significativa $p < 0.01$

IV. Tabla de presencia/ausencia de los HAP en aire interior de casas habitación de la Comunidad La Marcela, Miquihuana, Tamauliupas y en el humo de biomasa utilizada como fuente de energía Cuadro en esta comunidad.

Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos	HAP en aire interior de casas habitación				HAP en humo de biomasa		
	Casa 1	Casa 2	Casa 3	Casa 4	Pino	Encino	Madroño
Naftaleno	+	+	+	+	+	+	+
Acenafteno	+	+	+	-	-	-	-
Fluoreno	-	+	+	-	+	+	+
Fenantreno	+	+	+	+	+	+	+

Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos	HAP en aire interior de casas habitación				HAP en humo de biomasa		
	Casa 1	Casa 2	Casa 3	Casa 4	Pino	Encino	Madroño
Antraceno	+	+	+	+	+	-	+
2-Metilantraceno	-	-	+	-	-	-	-
1-Metilantraceno	-	+	+	-	-	-	-
4,5-Metilenfenantreno	-	+	+	+	+	-	+
3,6-Dimetilfenantreno	+	-	+	-	-	-	-
Fluoranteno	+	+	+	+	+	+	+
9,10-Dimetilantraceno	+	+	+	+	-	+	+
Pireno	+	+	+	+	+	+	+
Reteno	+	+	+	+	+	+	-
Benzo[a]fluoreno	+	+	+	+	+	+	+
Benzo[a]antraceno	+	+	+	+	-	-	-
Trifenileno	-	-	+	-	-	-	-
Criseno	+	+	+	+	+	+	+
Ciclopenta[c,d]pireno	+	+	+	+	+	+	+
Benzo[b]fluoranteno	+	+	+	+	+	-	+
Benzo[k]fluoranteno	+	+	+	+	-	-	-
Benzo[j]fluoranteno	+	+	+	+	+	-	-
Benzo[e]pireno	+	+	+	+	+	+	+
Benzo[a]pireno	+	+	+	+	+	-	+
Dibenzo[a,h]pireno	+	-	-	-	-	-	-
Dibenzo[a,h]antraceno	+	+	-	-	-	-	-
Dibenzo[a,c]antraceno	+	+	+	+	-	-	-
Indeno[1,2,3-cd]pireno	+	+	+	+	+	+	+
Benzo[ghi]perileno	+	+	+	+	+	+	+
Dibenzo[a,e]pireno	-	-	-	-	-	-	+
Benzo[a]antraceno	-	-	-	-	+	+	+

+ se detectó su presencia, - no se detectó su presencia

En el aire interior de las casas muestreadas se detectó la presencia de 28 HAP en concentraciones individuales dentro del rango de 0 a 220 ng/m^3, **cuadro IV**. El 64 % de ellos puede asumirse que provienen de la quema de madera en los fogones, ya que estos mismos HAP se encuentran en los filtros del experimento de laboratorio de la combustión de madera de las especies utilizadas como biomasa energética por los pobladores de la comunidad de la Marcela.

Es de destacar que siete de los HAP detectados en el aire interior no fueron detectados en las emisiones de la madera, estos fueron: Acenafteno, Benzo[k] fluoranteno, Dibenzo[a,c]antraceno, Dibenzo[a,h]antraceno, 3,6-Dimetilfenantreno, 1-Metilantraceno y 2-Metilantraceno, una posible causa de su presencia puede provenir de la emisión de contaminantes por el aceite de cocina durante el período de cocción (Zhu and Wang, 2003) y al uso de lámparas de keroseno para iluminación. El haber identificado otras posibles fuentes de emisión permite establecer rutas de exposición alternativas, lo cual puede ser de utilidad para una mejor gestión del riesgo. De estos el Benzo[k]fluoranteno es un posible carcinógeno (Grupo 2B) y Dibenzo[a,h]antraceno es un probable carcinógeno (Grupo 2A) además ambos se consideran mutagénicos, los demás pertenecen al grupo 3 o no están clasificados en cuanto a su capacidad carcinogénica o mutagénica.

No hay un nivel seguro de exposición a HAP debido a su carcinogenicidad, la Guía de Calidad del Aire Interior de la WHO (2010) utiliza a el Benzo [a] pireno (B[a]P) como marcador de exposición a HAP y evaluación del riesgo carcinogénicos. La concentración promedio de B[a]P en el aire de las casas fue de 61.18 ng/m^3, muy por arriba de lo recomendado, correspondiente a 0.012 ng B[a]P/m^3 para una exposición de por vida a B[a]P manteniendo un riesgo aceptable de cáncer (1 x 10^{-6}), por lo que los habitantes de la comunidad de la Marcela podrían estar en riesgo.

4. CONCLUSIONES

En la comunidad de la Marcela en el Municipio de Miquihuana se identificaron tres especies de madera utilizadas como fuente de energía para la calefaccion de sus hogares y la coccion de sus alimentos. Las especies identificadas fueron: Pino (*Pinus pseudostrobus*), Encino (*Quercus mexicana*) y Madroño (*Arbutus xalapensis*), las cuales tienen una emisión promedio de 0.194 mg HAP totales/kg peso seco, observándose diferencias en cuanto al tipo y cantidad de HAP emitidos. De estas especies la mas recomendable para su uso es la madera de Encino, ya que en sus emisiones no se detecto la presencia de Benzo(a)pireno, un reconocido agente carcinogenico, el cual si esta presente en las maderas de Pino y Madroño.

En el aire interior de las casas de la comunidad la Marcela en el Municipio de Miquihuana la concentración de HAP totales es de 856.91 $\pm$ 1209.48 ng/m^3, se detectó la presencia de 28 HAP en concentraciones individuales dentro del rango de 0 a 220 ng/m^3, de los cuales el 64 % de ellos puede asumirse que provienen de la quema de madera en los fogones y los restantes HAP de otras fuentes.

Entre los HAP detectados en el aire interior de las viviendas de la comunidad La Marcela destaca la presencia de Benzo[a]pireno en concentraciones por arriba del valor guía, por lo que esto representa un riesgo a la salud por ser un reconocido agente carcinogenico. Por lo que es recomendable promover el uso de la madera de encino, ya que en sus emisiones de HAP no se encuentra el B[a]P.

REFERENCIAS

ASTM E871-82 (2019) Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels. ASTM International.

ASTM E872-82 (2019) Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. ASTM International.

Aung, T. W., G. Jain, K. Sethuraman, J. Baumgartner, C. Reynolds, A. P. Grieshop, J. D. Marshall y M. Brauer. 2016. Health and Climate-Relevant Pollutant Concentrations from a Carbon-Finance Approved Cookstove Intervention in Rural India. Environ. Sci. Technol. 50:7228-7238. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b06208

Beristain-Montiel, E., R. Villalobos-Pietrini, G., E. Arias-Loaiza, S., L. Gómez-Arroyo, O. Amador-Muñoz. 2016. An innovative ultrasound assisted extraction micro-scale cell combined with gas chromatography/mass spectrometry in negative chemical ionization to determine persistent organic pollutants in air particulate matter. Journal of Chromatography A.1477:100-107. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2016.11.043

Bhargava A, Khanna R, Bhargava S, Kumar S (2004) Exposure risk to carcinogenic PAHs in indoor-air during biomass combustion whilst cooking in rural India. Atmos Environ 38:4761–4767. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.05.012

Bjoseth, T. Ramdahl, 1985. Handbook of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Vol. 2, Marcel Dekker, Inc, New York.

Castillo-Hernández, H., y J. Treviño-Carreón. 2014. Biología floral de agave geivtryi ullrich (agavaceae) en la localidad de la marcela, miquihuana, tamaulipas. Ciencia UAT, 14:62-66. [en línea] https://revistaciencia.uat.edu.mx/index.php/CienciaUat/article/view/354 10/06/2024

Chrysikou L, Gemenetzis P, Kouras A, Manoli E, Terzi E, Samara C (2008) Distribution of persistent organic pollutants, polycyclic aromatic hydrocarbons and trace elements in soil and vegetation following a large scale landfill fire in northern Greece. Environment International 34: 210-225. https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.08.007

Contreras-Hinojosa, José Rafael; Volke-Haller, Víctor; Oropeza-Mota, José Luis; Rodríguez-Franco, Carlos; Martínez-Saldaña, Tomás; Martínez-Garza, Ángel Disponibilidad y uso de leña en el municipio de Yanhuitlán, Oaxaca. Terra Latinoamericana, vol. 21, núm. 3, pp. 437-445. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57311097002

Daly GL, Lei YD, Castillo LE, Muir DCG, Wania F (2007) Polycyclic aromatic hydrocarbons in Costa Rican air and soil: A tropical/temperate comparison. Atmospheric Environment 41: 7339-7350. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.05.014

Darryl Ricardo Banjoo, Paul Kurt Nelson, Improved ultrasonic extraction procedure for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments, Journal of Chromatography A,Volume 1066, Issues 1–2, 2005, Pages 9-18, ISSN 0021-9673. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2005.01.033

Ding, J., J. Zhong, Y. Yang, B. Li, G. Shen, Y. Su, C. Wang, W. Li, H. Shen, B. Wang, R. Wang, Y. Huang, Y. Zhang, H. Cao, Y. Zhu, S. L.M. Simonich y S. Tao. 2012. Occurrence and exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and their derivatives in a rural Chinese home through biomass fuelled cooking. Environmental Pollution. 169:160-166. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.10.008

Duan, X. *, Jiang, Y., Wang, B., Zhao, X., Shen, G., & Cao, S., 2014. Household fuel use for cooking and heating in china: results from the first Chinese environmental exposure-related human activity patterns survey (CEERHAPS). Applied Energy, 2014, 136, 692-703. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.066

Eriksson A. C., Nordin E. Z., Nyströ̈m R., Pettersson E., Swietlicki E., Bergvall C., Westerholm R., Boman C., Pagels J. H., 2014. Particulate PAH Emissions from Residential Biomass Combustion: Time-Resolved Analysis with Aerosol Mass Spectrometry. Environ. Sci. Technol, 48, 7143−7150. http://dx.doi.org/10.1021/es500486j

Fuyong W., X. Liu, W. Wang, Y. B. Man, C. Y. Chan, W. Liu, S. Tao, M. H. Wong. 2015. Characterization of particulate-bound PAHs in rural households using different types of domestic energy in Henan Province, China. Science of The Total Environment. 536:840-846. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.101

Hernández-Garduño, E., E. Gómez-García, y S. Campos-Gómez. 2017. Prevalence trends of wood use as the main cooking fuel in Mexico, 1990-2013. Salud Pública de México. 59: 68-75. https://doi.org/10.21149/7770

IARC, 2010. Some Non-heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Some Related Exposures. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 92. World Health Organization. International Agency For Research On Cancer. Lyon, France. [en línea] https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Some-Non-heterocyclic-Polycyclic-Aromatic-Hydrocarbons-And-Some-Related-Exposures-2010 10/06/2024

INEGI, 2021. Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). [en línea] https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/ 10/06/2024

IPCS, 1988. Selected Non-heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. Environmental Health Criteria 202. International Programme on Chemical Safety. United Nations Environment Programme. International Labour Organization, World Health Organization, Geneve, Switzerland. [en línea] https://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc202.htm 10/06/2024

Jiang, R.T. y M. L. Bell, 2008. A comparison of particulate matter from biomass-burning rural and non-biomass-burning urban households in northeastern China. Environ. Health Perspect. 116:907–914. https://doi.org/10.1289/ehp.10622

Kochi, C., J. D. Ju, L.M. López, C.M. Zhang, M. C. Mauricio, S. Choi, D. Garay, V. Gonzalez, P. Briones, R. A. Accinelli. 2017. Respiratory Symptoms Frequency in Users of Gas Stoves Only Is Lesser than Gas Plus Biomass Fuel Combustion. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 195:S1, A5982.

Malarut, J. A. y K. Vangnai. 2018. Influence of wood types on quality and carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) of smoked sausages. Food Control. 85: 98-106. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.09.020

Muránszky, G., Óvári, M., Virág, I., Csiba, P., Dobai, R. & Záray, G. (2011). Chemical characterization of PM10 fractions of urban aerosol. Microchem. J., 98, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.microc.2010.10.002

Ni, K., E. Carter, J. J. Schauer, M. Ezzati, Y. Zhang, H. Niu, A: M. Lai, M. Shan, Y. Wang, X. Yang, J. Baumgartener. 2016. Seasonal variation in outdoor, indoor, and personal air pollution exposures of women using wood stoves in the Tibetan Plateau: Baseline assessment for an energy intervention study. Environment international. 94:449-457. https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.05.029

Nielsen I. E., Eriksson A. C., Lindgren R. Martinsson J., Nyström R., Nordin E. Z., Sadiktsis I., Boman C., Nøjgaard J. K., Pagels J., 2017. Time-resolved analysis of particle emissions from residential biomass combustion e Emissions of refractory black carbon, PAHs and organic tracers. Atmospheric Environment, 165, 179-190. http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.06.033

Quiroz-Carranza, J., y R. Orellana. 2010. Uso y manejo de leña combustible en viviendas de seis localidades de Yucatán, Méx. Madera y Bosques. 16:47-67 [en línea]. https://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v16n2/v16n2a4.pdf10/06/2024

Ramdahl, T., 1983 Retene a molecular marker of wood combustion in ambient air. Nature 306, 580–582. https://doi.org/10.1038/306580a0

Rennert, W. P., R. M. Porras, G. B. Muniz. 2014. The effects of smokeless cookstoves on peak expiratory flow rates in rural Honduras. J Public Health. 37: 455-460. https://doi.org/10.1093/pubmed/fdu087

SCF, 2002. Opinion of the Scientific Committee on Food on the Risk to human health of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food. European Commission Health And Consumer Protection Directorate-General, Brussels - Belgium. SCF/CS/CNTM/PAH/29 Final [en lìnea]. https://ec.europa.eu/food/fs/sc/scf/out153_en.pdf. 10/06/2024

Shen G., Tao S., Wei S., Zhang Y., Wang R., Wang B., Li W., Shen H., Huang Y., Chen Y., Chen H., Yang Y., Wang W., Wang X., 2012. Emissions of Parent, Nitro, and Oxygenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Residential Wood Combustion in Rural China. Environmental Science and Technology, 46, 8123−8130. https://doi.org/10.1021/es301146v

Wenxin Liu,† and Staci L. M. Simonich Rijal, H. B., H. Yoshida, T. Miyazaki, y I. Uchiyama. 2005. Indoor air pollution from firewood combustion in traditional houses of Nepal. Proceedings from 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Beijing, China, pp: 3625-3629.

White, A. J., y D. P. Sandler. 2017. Indoor Wood-Burning Stove and Fireplace Use and Breast Cancer in a Prospective Cohort Study. Environmental health perspectives, 125(7): 1-7. https://doi.org/10.1289/EHP827

WHO, 2010. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. World Health Organization Regional Office for Europe. Copenhagen, Denmark.

WHO. 2022. “Fact Sheets: Household Air Pollution.” Geneva: World Health Organization [en línea]. https://www.who.int/newsroom/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health 05/07/2023

WHO, 2023a. World health statistics 2023: monitoring health for the SDGs, Sustainable Development Goals. Geneva: World Health Organization. Licence: CC BY-NC- SA 3.0 IGO. [en linea]. https://www.who.int/publications/i/item/9789240074323 10/06/2024

WHO, 2023b. Proportion of population with primary reliance on fuels and technologies for cooking, by fuel type (%). THE GLOBAL HEALTH OBSERVATORY [en línea]. https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/gho-phe-primary-reliance-on-clean-fuels-and-technologies-proportion 5/7/2023.

WHO, 2023c. Household air pollution attributable deaths. THE GLOBAL HEALTH OBSERVATORY [en línea]. https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/household-air-pollution-attributable-deaths 5/7/2023

WHO, 2023d. Household air pollution attributable DALYs. . THE GLOBAL HEALTH OBSERVATORY [en línea]. https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/household-air-pollution-attributable-dalys 5/7/2023

Wiriya, W., S. Chantara, S. Sillapapiromsuk, y N. H. Lin. 2016. Emission profiles of PM10-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from biomass burning determined in chamber for assessment of air pollutants from open burning. Aerosol Air Qual. Res. 16: 2716-2727. https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.04.0278

Wu, F., X. Liu, W. Wang, Y. B. Man, C. Y. Chan, X. Liu, S. Tau y M. H. Wong. 2015. Characterization of particulate-bound PAHs in rural households using different types of domestic energy in Henan Province, China. Science of the Total Environment. 536: 840–846. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.101

Xu, S., W. Liu, y S. Tao. 2006. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons in China. Environmental Science & Technology. 40(3): 702-708. https://doi.org/10.1021/es0517062

Zhu L, Wang J., 2003) Sources and patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons pollution in kitchen air, China. Chemosphere 50: 61. https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00668-9

CAPÍTULO 10

TALLER SOBRE FARMACIA Y COCINA VIVIENTE EN LA RESERVA DE LA BIÓSFERA SIERRA DE HUAUTLA[1,2]

Data de submissão: 03/09/2026
Data de aceite: 17/09/2026

Amanda Ortiz Sánchez
Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos
Cuernavaca, Morelos, México
https://orcid.org/0000-0002-9789-181X

Angélica María Alemán Octaviano
Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos
Cuernavaca, Morelos. México
https://orcid.org/0009-0003-5338-5127

RESUMEN: En este capítulo se exponen las actividades realizadas en los talleres comunitarios en Tilzapotla, Morelos, México. Se trabajó principalmente con mujeres de todas las edades, con quienes se hicieron dinámicas para recordar y reconocer las especies botánicas locales mencionando sus nombres y usos. De esta actividad surgió un intercambio de información tradicional sobre las plantas medicinales y alimenticias. Las participantes reflexionaron sobre cómo el dejar de consumir estas plantas modifica su dieta y afecta su salud, y el dejar de utilizar las plantas medicinales hace que estas se olviden y se pierdan los saberes locales. Además, se prepararon productos galénicos para la elaboración de un botiquín básico para la atención primaria de salud familiar. Las mujeres prepararon alimentos tradicionales para presentarlos en una Muestra Gastronómica. También se llevó a cabo la siembra de hortalizas y la plantación de especies medicinales que el proyecto les donó para aumentar la riqueza de sus huertos. Se tomaron fotografías de los huertos y se presentaron en una Galería Fotográfica que todos los participantes disfrutaron mediante un recorrido y una convivencia. Durante las charlas en los talleres, las mujeres reflexionaron en la falta de tiempo para ir a recolectar plantas a los ambientes naturales, lo que contribuye a la disminución del uso de las plantas locales. Por lo tanto, cultivar plantas en los huertos familiares significa tenerlas a la mano, y al obtener estos recursos con mayor facilidad, se valora la función de este agroecosistema. Las mujeres reconocieron que los saberes tradicionales no siempre son transmitidos a sus hijos y nietos. Expresaron que es tiempo de actuar para fortalecer el uso y el cuidado de la diversidad biológica y cultural, así como la transmisión del conocimiento tradicional, en beneficio de sus familias.

PALABRAS CLAVE: plantas medicinales; plantas alimenticias; huertos familiares; conocimiento local.

[1] Estos talleres se llevaron a cabo con financiamiento de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).

[2] Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses, ni financiero, ni personal, en la información, presentación de datos y resultados de este artículo.

WORKSHOP ON PHARMACY AND LIVING CUISINE IN THE SIERRA DE HUAUTLA BIOSPHERE RESERVE

ABSTRACT: This chapter outlines the activities carried out during community workshops in Tilzapotla, Morelos, Mexico. Work was conducted primarily with women of all ages, and activities were designed to recall and identify local botanical species by discussing their names and uses. This process fostered an exchange of traditional knowledge regarding medicinal and edible plants. Participants also reflected on how ceasing to consume these plants alters their diets and impacts their health; regarding medicinal plants, they noted that if use stops, the plants are forgotten and local knowledge is lost. Galenic products were prepared to create a basic kit for family primary health care. The women prepared traditional dishes for a gastronomic showcase. Additionally, they planted vegetables and medicinal species donated by the project to enrich their home gardens. Photographs of these gardens were taken and displayed in a gallery, which participants enjoyed during a tour and social gathering. During workshop discussions, the women reflected on the lack of time to gather plants from natural environments – a factor contributing to the reduced use of local flora. Consequently, cultivating plants in home gardens ensures they are readily available, and having these resources at hand highlights the value of this agroecosystem. The women acknowledged that traditional knowledge is not always passed down to their children and grandchildren. They expressed that it is time to take action to strengthen the use and preservation of biological and cultural diversity, as well as the transmission of traditional knowledge, for the benefit of their families.
KEYWORDS: medicinal plants; food plants; homegardens; local knowledge.

1. INTRODUCCIÓN

México es reconocido a nivel mundial por la vasta experiencia etnobotánica que han generado las diversas comunidades a través de su interacción con el entorno [Camou et al. 2006]. Las poblaciones rurales realizan diferentes prácticas de manejo (con aproximadamente 7,000 especies vegetales) [Caballero y Cortés 2001] que son cruciales para mantener especies medicinales, alimenticias y otras de uso múltiple en los huertos familiares (Ortiz-Sánchez et al. 2015). De acuerdo con la OMS, el 80% de la población mundial hace uso de las plantas medicinales y las considera un componente fundamental al ser el principal recurso para atender las necesidades de salud dentro de la medicina tradicional (Argueta, 2009; Ortiz-Sánchez et al. 2025). Sin embargo, las más de 2000 especies de plantas alimenticias mexicanas contempladas en la base de datos BADEPLAM [Mapes y Basurto 2016] no siempre están disponibles para la población. Es aquí donde se fortalece el manejo de un huerto familiar como agroecosistema que ofrece múltiples recursos vegetales que benefician la salud y la economía de las poblaciones. Al mismo tiempo, se robustece la cultura local cuando la multifuncionalidad de los huertos influye en la riqueza biológica y expresa su condición adaptativa, además de

las transformaciones sociales, económicas y culturales (Castillo-Rodríguez et al. 2026; Guadarrama et al. 2020). Durante este proceso, los manejadores de los huertos se apropian del sistema para reconocer los servicios tangibles e intangibles que ofrecen estos agroecosistemas, y se dan cuenta del gran potencial que tienen para impulsar el escalamiento de la agroecología en diversas vertientes (Fontalvo-Buelvas 2021). Una forma de implementar esta estrategia es mediante la participación de las universidades como parte de su compromiso social. En este sentido, la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, a través del Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación (CIByC), busca contribuir a la conservación de la diversidad biológica y cultural del país por medio de la investigación científica, la docencia y el trabajo comunitario, principalmente en las comunidades de la Reserva de la Biósfera Sierra de Huautla (REBIOSH). Con base en lo anterior, se propuso la impartición de talleres comunitarios para fortalecer y valorar el uso y manejo de las plantas medicinales y alimenticias en los huertos familiares.

1.1. DESARROLLO

Aquí se presentan las actividades y los resultados de los talleres impartidos como parte de un proyecto comunitario más amplio que el CIByC ha venido realizando desde el año 2000 en diferentes comunidades de la REBIOSH. La información que aquí se muestra corresponde al trabajo realizado en la comunidad de Tilzapotla, Morelos, México. Se llevaron a cabo visitas domiciliarias para obtener una lista de personas que estuvieron de acuerdo en participar de nuevo en esta etapa del proyecto. La lista estuvo conformada por mujeres de todas las edades, incluyendo niñas y adultas, estas últimas de entre 28 y 80 años. En los talleres se llevaron a cabo distintas dinámicas para reconocer las especies botánicas, recordar sus nombres y usos, intercambiar información, elaborar productos medicinales a base de plantas, preparar alimentos tradicionales, sembrar hortalizas y plantas medicinales y tomar fotografías de los huertos familiares ya establecidos y complementados con otras plantas que el proyecto les donó durante los talleres. La organización del grupo de mujeres también fue una actividad que nutrió el proyecto. Ellas tuvieron la libertad de elegir las plantas que querían incorporar a sus huertos y las que querían utilizar para preparar los platillos y las bebidas que deseaban presentar en la muestra gastronómica.

1.2. RECONOCIENDO LOS RECURSOS BOTÁNICOS LOCALES

Para recordar los nombres de las plantas se utilizó la técnica de listado libre, que dio como resultado una lista de especies de las cuales se mencionaron los usos, la parte de la planta utilizada y el lugar de procedencia. El objetivo de esta actividad fue

documentar las plantas que conocen y utilizan y de dónde las obtienen. En el taller hubo un intercambio del conocimiento tradicional que tienen las participantes sobre estos recursos, quienes también señalaron las causas por las cuales dejan de usar algunas de estas plantas. El dejar de utilizar las plantas alimenticias modifica la dieta diaria y afecta la salud. En cuanto a las medicinales, su desuso provoca que los saberes tradicionales ya no se transmitan a las siguientes generaciones, se olviden y, con el paso del tiempo, se pierdan. Por esta razón, se hizo énfasis en la importancia de conocer los recursos locales, difundir sus usos y proponer estrategias educativas para su uso y conservación.

1.3. ELABORACIÓN DE UN BOTIQUÍN A BASE DE PLANTAS MEDICINALES

El objetivo de esta actividad fue que la población participante conociera los preparados galénicos. Estos son productos curativos que contienen mezclas de los compuestos naturales de las plantas medicinales utilizadas para su elaboración, las cuales son sometidas a un procesamiento parcial de transformación (Martínez 2000). En este taller las mujeres aprendieron la forma de elaborar tinturas con plantas de estafiate (*Artemisia ludoviciana* subsp. *mexicana* (Willd. Ex Spreng) D.D. Keck), de guayabo (*Psidum guajava* L.) y de nim (*Azadirachta indica* A. Juss.) para el sistema digestivo; pomada de árnica (*Heterotheca inuloides* Cass.) para los golpes; jarabe para la tos con *Crescentia alata* Kunth, *Amphipterygium adstringens* (Schltdl.) Schiede ex Standl., *Heterotheca inuloides* y *Raphanus sativus* L.; y un jabón suavizante a base de avena (*Avena sativa* L.) para aliviar la resequedad de la piel. Estos productos formaron parte del botiquín básico para la atención primaria de la salud que obtuvo cada participante.

1.4. PRESENTACIÓN DE UNA MUESTRA GASTRONÓMICA CON PLANTAS LOCALES

Para fortalecer la importancia de continuar utilizando las plantas alimenticias locales, dado que también juegan un papel básico en la salud de las familias, se organizó la presentación de diversos alimentos y bebidas elaborados con plantas locales mediante una *Muestra Gastronómica*. Las mujeres prepararon guisados con flor de calabaza, guajes, elote y verdolagas; ensaladas; aguas frescas de capitaneja y de tlachichinol; dulces de papaya; tamales de ciruela y de calabaza; y salsa de ciruela, entre otros. Después de ser presentados, los guisados se degustaron en una sesión de convivencia.

1.5. SIEMBRA DE HORTALIZAS EN EL HUERTO FAMILIAR

Esta actividad inició con una dinámica de lluvia de ideas para que las participantes eligieran las especies que querían sembrar durante el taller. Las variables que se

consideraron fueron las condiciones ambientales del sitio y las plantas que se usan frecuentemente en la elaboración de los alimentos. El objetivo fue promover una técnica agroecológica que la gente pudiera combinar con sus prácticas tradicionales. Este taller también tuvo la función de incrementar la diversificación de los recursos botánicos en la alimentación de la familia. Se formaron equipos de trabajo y el taller inició con la germinación y la respectiva siembra de semillas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L), cilantro (*Eryngium foetidum* L.), perejil (*Coriandrum sativum* L.), y zanahoria (*Daucus carota* convar. *longus* Alef.), entre otras.

1.6. GALERÍA FOTOGRÁFICA DE LOS HUERTOS FAMILIARES EN LA COMUNIDAD DE TILZAPOTLA

Como una actividad complementaria en este proyecto, se propuso hacer una exposición con fotografías de los huertos familiares de las participantes. El objetivo fue mostrar una prueba gráfica de la realidad de esos espacios de cultivo que son un testimonio cultural. Las fotografías también permitieron exhibir la creatividad de cada una de las mujeres participantes, en particular con respecto a la distribución espacial de las plantas, ya que, en la actualidad, la reducción de los terrenos para el cultivo de plantas es una limitante. El potencial pedagógico de la fotografía fue utilizado para entusiasmar a las personas participantes en el taller, así como para mostrar el trabajo colaborativo (González y Claro, 2015).

2. RESULTADOS

Parte de los resultados de la actividad 1, "*Reconociendo los recursos botánicos locales*", se presentan en la Tabla 1. Cabe destacar que el número de plantas que las participantes mencionaban aumentaba mientras más platicaban, recordando sus nombres y usos. Durante la convivencia y la reflexión reconocieron que hay plantas que han dejado de usar, plantas de uso frecuente y también especies que han escaseado y que difícilmente consiguen en la actualidad. Las participantes, además, hablaron con especial cuidado sobre sus plantas preferidas, que por diversas razones mantienen en sus viviendas. Entre estas también se encuentran plantas ornamentales y de uso religioso.

Tabla 1. Lista florística. Nombre científico y nombre común. Categorías de uso: O= Ornamental, A= Alimenticia, R= Religioso, M= Medicinal. Estructura botánica: H= Hoja, Fl= Flor, Fr= Fruto, S= Semilla, T= Tallo; C= Corteza. Lugar de procedencia: HF= Huerto Familiar, C= Campo, M= Milpa.

Nombre científico	Categorías de uso	Estructura botánica utilizada	Lugar de procedencia
Disphania ambrosoides (L.) Mosyakin & Clemants. Epazote	A, M	H, T	HF
Verbesina crocata (Cav.) Less Capitaneja	A, M	H	HF, C
Citrus aurantifolia (Christm.) Swingle Limón	A, M	Fr, H	HF
Tournefortia hirsutissima L. Tlachichinol	A, M	H	HF, C
Cucurbita argyrosperma K. Koch Calabaza	A, R	Fl, Fr, S,	HF, M
Zea mays L. *Maíz*	A, R	H, Fl, Fr, S	HF, M,
Dieffenbachia Schott Gracena	O	Toda la planta	HF
Byrsonima crassifolia (L.) Kunth Nanche	A, M	Fr, C	HF, C
Aloe barbadensis Mill. Sábila	M, R	H, Fl	HF
Pereskia aculeata Mill. Uña de gato	M, A, R	H, Fl	HF
Mangifera indica L. Mango	A, M	Fr, H	HF, C
Spondias mombin L. Ciruela	A, R	Fr	HF
Artemisia ludoviciana subsp. *mexicana* (Willd. ex Spreng.) D.D.Keck. Estafiate	M, R	H, Toda la planta	HF
Porophyllum obtusifolium DC. Pápalo	A	H	HF, C
Senecio salignus DC. Jarilla	M, R	H	HF
Crescentia alata Kunth Cirian	M	Fr	HF, C
Mentha canadensis L. Hierbabuena	A, M	H	HF
Piper amalago L. *Cordoncillo*	M	H	HF
Guazuma ulmifolia Lam. Cuaulote	M	Fr	HF, C

Nombre científico	Categorías de uso	Estructura botánica utilizada	Lugar de procedencia
Vitex mollis Kunth Cuayotomate	M	H	C
Portulaca oleracea L. Verdolaga	A	Toda la planta	HF, M
Musa paradisiaca L. Plátano	A	Fr	HF

Algunas de las plantas apreciadas son ciruela, nanche, mango, maíz, y calabaza. Estas son llamadas así porque también los familiares migrantes que visitan a las participantes esporádicamente las valoran tanto que les piden a las mujeres que utilicen estrategias para conservarlas mediante congelación y/o secado para poder consumirlas durante su visita. Con esto se confirma que las plantas preferidas tienen un alto valor de uso, no solo por su abundancia, sino también por la gente que se interesa en estas especies debido a un significado cultural.

Los factores identificados que intervienen en la continuidad del uso de los recursos botánicos fueron el acceso que los usuarios tienen a estos, que puede estar limitado por la falta de tiempo para ir al campo a traer ciertas plantas, y la falta de interés por seguir usando las plantas de uso tradicional. Las mujeres también mencionaron que, debido al poco uso de las plantas, ya no recordaban con claridad los nombres y las formas de preparación de algunas de ellas. En este sentido, cobra relevancia el fortalecimiento de los huertos familiares, ya que la frecuencia de uso de los recursos está relacionada con la disponibilidad de estos.

Las participantes también hicieron énfasis en el conocimiento que recibieron de sus padres y abuelos, cuya longevidad relacionaron con su estilo de alimentación. Las mujeres compartieron recetas de cocina de sus abuelos, así como algunas anécdotas de su historia de vida. También reconocieron que estos saberes no siempre han sido transmitidos a sus hijos y nietos, lo que tradujeron en compromisos como dialogar más con la familia sobre estos temas y difundir sus saberes tradicionales.

La riqueza de las plantas reconocidas entre todas las participantes las motivó para apropiarse del proyecto y dar continuidad a las actividades realizadas durante los talleres. La actividad 2, *"Elaboración de un botiquín a base de plantas medicinales"*, permitió a las participantes disponer de productos galénicos mediante el botiquín que obtuvieron (Fig. 1), el cual podrán surtir preparando más productos con otras plantas que ellas reconocen. Esto ofrece las ventajas de atender las necesidades de salud familiar de manera oportuna y el ahorro económico que representa no comprar medicamentos.

Otro gran beneficio de los preparados galénicos es que se pueden conservar por largos periodos de tiempo, lo que permite tenerlos disponibles siempre, aun cuando la planta no está presente en el medio natural.

Figura 1. Presentación del botiquín elaborado por las participantes del taller.



De la actividad 3, *"Presentación de la Muestra Gastronómica con plantas locales"*, surgieron múltiples interacciones entre las mujeres, a través de las cuales intercambiaron los detalles de las recetas y compartieron las formas de utilizar ciertos ingredientes y hasta las cantidades de estos. Durante la degustación de los alimentos hubo risas y más charlas sobre los recuerdos que vinieron a sus mentes sobre los guisos que sus familiares preparaban.

Mediante la actividad 4, *"Siembra de hortalizas en el Huerto Familiar"*, las participantes se dieron cuenta de que se logró incrementar la diversificación de los recursos botánicos, que ahora están disponibles para la alimentación de la familia. También pudieron apreciar la creatividad de sus compañeros (Figura 2). Por otro lado, poder disfrutar de las hierbas frescas de sus hortalizas y diversificar su dieta repercute de forma positiva en su nutrición y contribuye a generar lo intangible: sentimientos de satisfacción. Esto se puede observar en algunos comentarios textuales:

> *Para mí es muy satisfactorio cultivar plantas en el huerto, asegurándome hacer la producción de la manera más limpia u orgánica posible, y así procurar la salud de quienes lo consumimos. Para mí es un orgullo alimentar a mi familia con los productos del huerto* (Sra. Luz Ma. Rojas).
>
> *Sembrar en el huerto es una de las cosas más tradicionales, teniendo varias plantas ya es una base para comer. Mi papá me decía que antes hacían trueques, cambiaban frijol por gallinas, cazuelas por frijol, y así comían mejor* (Sra. Alejandrina Ortiz).

Figura 2. (a) Cultivo de diversas especies aromáticas, (b) cultivo de plantas de chile.



La actividad 5, *"Presentación de una Galería Fotográfica",* fue una sesión bastante enriquecedora. Fue muy grato para todas las personas asistentes que visitaron la Galería ver sus huertos y los de sus vecinos fotografiados. En la Figura 3 se pueden observar los rostros alegres que señalan y comentan el tema. Las personas hicieron y recibieron opiniones entre ellas, comentando las nuevas ideas sobre el manejo de su huerto en el futuro.

Figura 3. Recorrido en la Galería Fotográfica.



3. CONCLUSIÓN

Los talleres impartidos permitieron promover e incrementar en las personas participantes el interés por compartir saberes, ampliar sus conocimientos y, sobre todo, buscar un cambio de actitud frente al uso de los recursos botánicos locales.

El diálogo generado durante los talleres sobre la disponibilidad de los recursos botánicos fomentó la reflexión sobre las estrategias que se pueden emplear para el mantenimiento de los recursos a lo largo del tiempo. Las participantes se dieron cuenta del valor que tiene el huerto familiar, dada su función como sistema productivo que provee de forma práctica y accesible una gran cantidad de productos alimenticios y medicinales, y que puede aportar beneficios para la salud e incluso para la economía familiar. Las experiencias que se viven en este tipo de talleres aportan elementos para continuar analizando con mayor profundidad lo que la gente cree, conoce y hace respecto a los recursos botánicos en su comunidad, es decir, la forma en que pone en práctica su conocimiento tradicional. Las estrategias implementadas en los talleres hicieron visible lo tangible e intangible de sus prácticas de manejo, y las personas participantes quedaron convencidas de que en los huertos familiares se lleva a cabo una práctica educativa.

REFERENCIAS

Argueta, A. (1994). *Atlas de las plantas de la medicina tradicional mexicana (Tomos I, II y III)*. Instituto Nacional Indigenista.

Caballero, J., & Cortés, L. (2001). Percepción, uso y manejo tradicional de los recursos vegetales en México. En B. Rendón Aguilar, S. Rebollar Domínguez, J. Caballero Nieto & M. A. Martínez Alfaro (Eds.), *Plantas, cultura y sociedad: Estudio sobre la relación entre seres humanos y plantas en los albores del siglo XXI* (pp. 79–100). Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa; Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.

Camou-Guerrero, A., Casas, A., Moreno-Calles, A. I., Aguilera-Lara, J., Garrido-Rojas, D., Rangel-Landa, S., Torres, I., Pérez-Negrón, E., Solís, L., Blancas, J., Guillén, S., Parra, F., & Rivera-Lozoya, E. (2016). Ethnobotany in Mexico: History, development, and perspectives. In R. Lira, A. Casas, & J. Blancas (Eds.), *Ethnobotany of Mexico: Interactions of people and plants in Mesoamerica* (pp. 21–40). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6669-7_2

Castillo-Rodríguez, V., Antonio-Joaquín, M. G., Cetzal-Ix, W., López-Castilla, H., Tamayo-Cen, I., & Basu, S. K. (2026). Home gardens as a Mayan biocultural reservoir of flora in the northern Campeche, Mexico: A floristic and phylogenetic approach. *Agroforestry Systems, 100*, 48. https://doi.org/10.1007/s10457-025-01425-z

González Fulle, B., & Claro Eyzaguirre, A. (2015). *El potencial educativo de la fotografía: Cuaderno pedagógico*. Consejo Nacional de la Cultura y las Artes.

Guadarrama Martínez, N., Chávez Mejía, M. C., Rubí Arriaga, M., & White Olascoaga, L. (2020). La diversidad biocultural de frutales en huertos familiares de San Andrés Nicolás Bravo, Malinalco, México. *Sociedad y Ambiente*, (22), 237–264. https://doi.org/10.31840/sya.vi22.2107

Mapes, C., & Basurto, F. (2016). Biodiversity and edible plants of Mexico. In R. Lira, A. Casas, & J. Blancas (Eds.), *Ethnobotany of Mexico: Interactions of people and plants in Mesoamerica* (pp. 83–132). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6669-7_5

Martínez, E. (2000). *Microdosis: Medicina para un nuevo milenio*. Universidad Autónoma del Estado de Zacatecas.

Ortiz-Sánchez, A., Monroy-Ortiz, C., Romero-Manzanares, A., Luna-Cavazos, M., & Castillo-España, P. (2015). Multipurpose functions of home gardens for family subsistence. *Botanical Sciences, 93*(4), 791–806.

Ortiz-Sánchez, A., Sotelo Millán, L. E., Flores-Franco, G., Linares, E., Beltrán-Rodríguez, L., & Aguilar-Dorantes, K. M. (2025). Plantas medicinales que se comercializan en los mercados de la ciudad de Iguala, Guerrero, México. *Botanical Sciences, 103*(3), 596–609. https://doi.org/10.17129/botsci.3695

CAPÍTULO 11

BEYOND PUBLIC ACCEPTANCE: REFRAMING NUCLEAR ENERGY COMMUNICATION IN INDONESIA

Data de submissão: 18/09/2026
Data de aceite: 23/09/2026

Muhammad Yunus Zulkifli
National Research and Innovation Agency of Indonesia (BRIN)
Jakarta-Indonesia
https://orcid.org/0000-0002-8521-7887

Yunita Permatasari
National Research and Innovation Agency of Indonesia (BRIN)
Jakarta-Indonesia
https://orcid.org/0000-0002-3707-5028

Atika Ratna Sari
National Research and Innovation Agency of Indonesia (BRIN)
Jakarta-Indonesia
https://orcid.org/0009-0002-2101-4885

ABSTRACT: Nuclear energy communication is often framed as an effort to improve public understanding and increase public acceptance of nuclear technology. Such an approach, however, may reduce communication to an instrumental activity in which scientific information is transmitted to the public to support a predetermined technological or policy agenda. This chapter proposes a broader understanding of nuclear energy communication as a process through which scientific knowledge is translated, represented, circulated, and interpreted as a public issue. Drawing on a constructivist paradigm and a qualitative case study, the chapter examines the communication practices of the Indonesian Nuclear Society Association (HIMNI), nuclear scientists, and Indonesian research institutions. Data were collected through interviews with nuclear scientists, participatory observation of HIMNI webinar activities, and document analysis of communication materials produced by HIMNI, the National Research and Innovation Agency, and the former National Nuclear Energy Agency. The analysis shows that nuclear energy communication in Indonesia is shaped by several interconnected processes. First, nuclear energy is commonly represented through scientific, technological, and developmental narratives. Second, complex technical knowledge is translated into more accessible public explanations through popular media, webinars, and institutional communication. Third, communication tends to emphasize the potential benefits of nuclear technology, while uncertainty, risk, historical controversy, and competing public interpretations receive less systematic attention. Fourth, institutional changes from BATAN to BRIN have created a communication gap, particularly through the discontinuation of NUTECH and the limited availability of public-oriented nuclear education content on institutional platforms. The chapter argues

that nuclear energy communication should be understood not merely as a strategy for producing acceptance, but as a process of constructing public meaning around energy, technology, risk, and national development.

KEYWORDS: nuclear energy communication; science communication; media representation; knowledge translation; public meaning.

1. INTRODUCTION

Science is not only a body of specialized knowledge. It is also a way of thinking and a social practice that becomes meaningful through its relationship with wider society. Scientific knowledge is therefore not confined to scientists, research institutions, or technical communities. It is also interpreted by citizens, journalists, policymakers, educators, and other social actors. However, the relationship between scientific knowledge and public understanding is not always straightforward. Technical language, institutional boundaries, unequal access to information, and differences in cultural experience may create difficulties in translating scientific explanations into forms that can be understood and interpreted by wider publics.

Science communication has an important role in this process. It connects scientific communities, public institutions, media organizations, and citizens through different forms of interaction. These forms include journalistic reporting, public lectures, exhibitions, webinars, social media, institutional websites, and educational activities. Science communication is consequently not limited to the transmission of scientific facts. It also involves the selection of issues, the organization of narratives, the use of particular media forms, and the negotiation of meanings between experts and non-experts (Bauer & Bucchi, 2008; Bucchi, 2013; Bucchi & Trench, 2014; Kappel & Holmen, 2019; Nielsen, 2022).

The issue becomes more complex when scientific knowledge concerns contested or risk-associated technologies. Nuclear energy is linked to low-carbon development and energy security, but also to safety, radioactive waste, economic cost, institutional accountability, emergency preparedness, and public trust. In Indonesia, nuclear power has been discussed in relation to energy planning, net-zero emissions, and energy diversification, yet sustained and coordinated public communication remains limited (Rahmanta et al., 2023); (Santosa et al., 2023); (Massagony et al., 2025).

Previous discussions of nuclear energy communication emphasize public understanding, literacy, trust, and acceptance. These concerns are important, but they may create an instrumental understanding of communication, evaluated primarily by whether it makes the public more supportive of nuclear technology. Such a framework can overlook how nuclear energy becomes meaningful through scientific explanations, institutional statements, media narratives, educational materials, and public discussions.

Previous research in Indonesia has examined educational innovation, nuclear scientists, and professional organizations in translating complex scientific knowledge for wider publics. Zulkifli (2026), for example, analyzed HIMNI communication activities and highlighted public-oriented communication, digital media, and educational strategies in presenting nuclear technology (Rogers et al., 2014). Building on this study, the present chapter shifts the analytical focus toward how nuclear energy is represented, translated, and constructed as a public issue.

This chapter therefore shifts the analytical focus from communication as an instrument for producing acceptance to communication as a process of constructing public meaning. The central concern is not simply whether nuclear scientists communicate effectively, but how nuclear energy is represented and translated as a public issue. This includes examining how scientific, environmental, technological, economic, and political meanings are connected in communication practices.

The chapter addresses the following main research question:

How is nuclear energy constructed as a public issue through scientific communication and media representation in Indonesia?

The question is developed through three subsidiary questions:

1. How are nuclear energy and nuclear power plants represented in public communication materials?
2. How are scientific, environmental, economic, political, and technological meanings connected in these representations?
3. How do communication practices translate complex nuclear issues into narratives that can be interpreted by wider publics?

2. NUCLEAR ENERGY COMMUNICATION IN INDONESIA

Nuclear technology in Indonesia has developed through both energy and non-energy applications. Non-energy applications include agriculture, health, industry, and other technical fields, while the energy sector concerns the development of nuclear power plants. The distinction is important because public communication about nuclear technology may produce different meanings depending on the application being discussed. Nuclear technology used in health or agriculture may be represented through narratives of service, innovation, and social benefit. Nuclear power plants, by contrast, are more directly connected with questions of national energy policy, environmental impact, infrastructure, safety, and long-term public responsibility.

The development of nuclear power plants in Indonesia has been linked to national energy security and the energy transition. Some policy discussions identify nuclear energy as a potential source of low-carbon electricity, particularly in relation to the target of achieving net-zero emissions by 2060. However, nuclear energy also raises economic and institutional questions, including the cost of construction and maintenance, fuel availability, regulatory capacity, and the readiness of national institutions. These dimensions mean that nuclear energy cannot be understood only as a technical object. It is simultaneously an energy policy, an economic project, an environmental issue, and a public controversy.

Communication connects these dimensions. Public understanding is shaped not only by scientific information but also by the forms through which it circulates. Mainstream media, face-to-face events, institutional websites, social media, and online discussions contribute to the circulation of nuclear narratives. Bultitude (2011) identifies mainstream media, face-to-face communication, and online interaction as important science communication channels.

In Indonesia, nuclear communication is also shaped by institutional transformation. Nuclear research and development were historically associated with BATAN. Following the establishment of BRIN, nuclear research activities were incorporated into a broader institutional structure. This transition created opportunities for interdisciplinary research while raising questions about the continuity and visibility of public-facing nuclear communication.

The earlier communication infrastructure included NUTECH, a popular science publication associated with BATAN. The source material indicates that NUTECH was no longer published during the BRIN period, while BRIN's website contained limited content specifically designed for public education and campaigns concerning nuclear energy. Institutional reorganization can therefore alter the channels through which scientific knowledge is translated and circulated.

3. CONCEPTUAL FRAMEWORK

3.1. SCIENCE COMMUNICATION AS MEANING-MAKING

Science communication has traditionally been associated with the dissemination of scientific knowledge from experts to non-experts. However, contemporary scholarship emphasizes that communication is not simply a linear process of information transfer. It involves interaction, interpretation, negotiation, and the construction of meaning between different communities, including questions of credibility and the relationship between science and wider publics (Gregory & Miller, 1998).

Kappel & Holmen (2019) show that science communication may pursue several aims, including the transmission of information, the development of understanding, the promotion of participation, and the support of decision-making. These aims are not necessarily equivalent. Communication intended to inform the public may differ from communication intended to persuade the public to support a particular policy or technology.

If communication is understood primarily as persuasion, scientific explanations may be organized according to their ability to generate confidence in nuclear technology. If understood as meaning-making, analysis must also consider which concerns are visible, which uncertainties are acknowledged, and how different interpretations are accommodated.

Science communication is therefore treated in this chapter as a process through which scientific knowledge is made socially available and becomes connected to public concerns. The process includes at least four dimensions:

1. Selection, referring to the choice of scientific issues and information to be communicated.
2. Translation, referring to the movement from technical language into accessible explanations.
3. Representation, referring to the construction of narratives, images, categories, and frames.
4. Interpretation, referring to the ways in which publics may understand and evaluate the communicated issue.

These dimensions are analytically connected: selection shapes what can be translated; translation involves choices about language and emphasis; representation connects scientific information with broader social meanings; and interpretation is shaped by the narratives and contexts through which information becomes available.

3.2. MEDIA REPRESENTATION AND PUBLIC MEANING

Media representation is not a neutral mirror of reality. It organizes social issues through selections, emphases, and narrative structures. In science and technology, representation may connect technical objects with meanings such as progress, risk, modernization, environmental responsibility, national development, or public danger.

Nuclear energy may therefore be represented as a solution to energy insecurity, a low-carbon technology, a symbol of technological advancement, or a source of risk. These meanings may coexist, but they are not always equally visible. A communication

environment dominated by benefit-oriented narratives may provide limited space for uncertainty, disagreement, or historical controversy.

The analysis does not assume that a representation is inherently correct or incorrect. Instead, it examines how representations are constructed and what kinds of public interpretation they make possible, consistent with a constructivist understanding of communication.

3.3. KNOWLEDGE TRANSLATION

Knowledge translation refers to transforming specialized knowledge into forms that can circulate beyond its original professional context. It may involve simplifying technical language, using analogies, selecting examples, producing visual materials, or connecting scientific concepts with everyday experience. The form and style of communication can shape accessibility to non-specialist audiences (Bucchi, 2013).

Translation is not purely technical. It also involves interpretation and framing. When scientists explain nuclear power plants to the public, they decide which dimensions to emphasize, what examples to use, and how to relate technical information to public concerns. Translation can therefore increase accessibility while narrowing or redirecting meanings.

The chapter uses knowledge translation to examine how nuclear scientists and institutions communicate complex issues to wider audiences. Translation is understood not as simple reduction of complexity, but as the reorganization of scientific knowledge into public narratives.

4. METHODOLOGY

This chapter uses a constructivist paradigm and a qualitative case study approach. The case concerns the communication of nuclear energy in Indonesia, with particular attention to the Indonesian Nuclear Society Association, or HIMNI, and to the public communication activities of nuclear scientists and research institutions.

The case study approach is appropriate because nuclear energy communication is situated within institutional, technological, political, and cultural contexts. The analysis focuses on communication practices rather than statistically measuring public acceptance.

Data were collected through three interconnected methods. First, interviews were conducted with two nuclear scientists associated with HIMNI. The first interviewee was Geni Rina Sunaryo, a female nuclear scientist affiliated with BRIN and formerly associated with BATAN. Her communication activities included writing for several media outlets. The

second interviewee was Harun Ardiansyah, a doctoral graduate in nuclear-related science who had written for scientifically oriented media, including The Conversation.

Second, participatory observation was conducted through HIMNI webinar activities. The webinar series was observed as a form of public communication in which nuclear scientists and other participants discussed nuclear-related issues. The observation focused on the organization of communication, the role of experts, the subjects discussed, and the relationship between technical explanations and wider public concerns.

Third, document analysis was conducted on communication materials produced by HIMNI, BRIN, and BATAN. The materials included content published on the HIMNI website, information displayed through BRIN's institutional website, and NUTECH, the popular nuclear science publication associated with BATAN. The analysis considered the topics selected, the intended audiences, the narrative emphasis, and the availability of educational content.

The three forms of data were triangulated. Interviews provided insight into scientists' experiences and practices; observation captured communication activities in public settings; and document analysis examined institutional materials and representational patterns.

The analysis was organized around four categories: scientific and developmental narratives, knowledge translation, benefit-oriented representation, and institutional communication gaps. The purpose was to examine how nuclear energy was made intelligible and meaningful through communication rather than whether communication produced acceptance.

5. FINDINGS

5.1. NUCLEAR ENERGY AS A SCIENTIFIC AND DEVELOPMENTAL NARRATIVE

The communication of nuclear energy in Indonesia is strongly connected with scientific and developmental narratives. Nuclear technology is commonly introduced through its relationship with scientific progress, technological capability, energy security, and national development. In this narrative, nuclear scientists are positioned as important sources of knowledge who can explain technical issues to the public and policymakers.

However, positioning scientists as public communicators creates a particular structure of communication. Scientific knowledge tends to enter public discussion through expert authority, which may strengthen credibility while leaving limited space for local experience, public concern, historical memory, or critical interpretations.

The developmental representation places emphasis on what nuclear power may contribute to the country, connecting it with future energy provision and low-carbon development. Nuclear energy may consequently appear primarily as a matter of technological planning and national policy rather than an issue requiring public interpretation and deliberation.

5.2. TRANSLATING TECHNICAL KNOWLEDGE INTO PUBLIC NARRATIVES

The interviews and observations indicate that nuclear scientists recognize the importance of translating technical knowledge into language that can be understood by wider audiences. Scientific publications often use specialized terminology and focus on technical accuracy. Public communication, by contrast, requires attention to readability, context, examples, and the experiences of non-specialist audiences.

Translation remains demanding. The earlier study identified language, perception, and value-related problems as barriers. These concern movement from technical terminology into semi-popular language, the prioritization of scientific precision over accessibility, and assumptions about the attractiveness or newsworthiness of scientific issues for media audiences.

Knowledge translation is therefore not simply vocabulary simplification. It requires decisions about relevance, examples, and connections with public experience. For nuclear energy, this includes explaining less visible issues such as radiation, radioactive waste, emergency preparedness, regulatory oversight, and long-term responsibility.

The available data suggest that nuclear communication uses several channels for translation, but these have not formed a fully coordinated public communication system. Individual scientists may write for selected media outlets or participate in webinars, while institutional communication remains uneven.

5.3. THE DOMINANCE OF BENEFIT-ORIENTED COMMUNICATION

A recurring pattern in nuclear energy communication is the emphasis on the potential benefits of nuclear technology. These benefits include low-carbon electricity, energy security, technological advancement, and support for national development. Such narratives are understandable because nuclear energy is frequently discussed in relation to the energy transition and the need to diversify energy sources.

A benefit-oriented narrative may nevertheless produce an incomplete representation when it is not accompanied by discussion of uncertainty, risk, cost, and

institutional accountability. Nuclear energy is also a socio-technical project requiring public trust, regulatory capacity, financial resources, and long-term institutional commitment.

A more comprehensive approach would place potential benefits alongside the uncertainties and responsibilities associated with nuclear development, allowing public meaning to be constructed through a broader narrative.

5.4. LIMITED VISIBILITY OF UNCERTAINTY AND CONTESTATION

Nuclear energy communication also reveals a limited visibility of uncertainty and contestation. Scientific and institutional communication often seeks to present information clearly and authoritatively. This is useful for public education, but it may obscure the fact that nuclear energy involves competing interpretations and unresolved questions. Ethical approaches to science communication emphasize responsibilities concerning transparency, uncertainty, public interests, and the conditions under which scientific issues are communicated (Medvecky & Leach, 2019; Priest et al., 2019).

Scientific uncertainty does not necessarily indicate a lack of knowledge. It may reflect limits of evidence, differences in models, or the complexity of future outcomes. Communicating uncertainty responsibly can help publics understand why experts may disagree and why policy decisions require deliberation.

In nuclear energy, uncertainty may concern economic feasibility, development timing, fuel availability, technological choices, safety arrangements, and regulatory capacity. Communication that does not address these dimensions may construct nuclear energy as a technical object whose development is primarily a matter of expert decision.

The limited visibility of contestation is also related to the institutional position of scientists. Scientists are often expected to provide accurate information and support evidence-based policy. However, public communication may require them to acknowledge the social and political dimensions of scientific issues. Nuclear energy is not interpreted only through scientific evidence. It is also connected with public values, historical experiences, environmental concerns, and perceptions of institutional trustworthiness.

5.5. INSTITUTIONAL GAPS IN NUCLEAR ENERGY COMMUNICATION

The document analysis indicates a significant institutional gap in the public communication of nuclear energy. NUTECH, which had served as a popular nuclear science publication during the BATAN period, was no longer published in the BRIN period. The discontinuation of this publication reduced one established channel through which nuclear science could be communicated to wider audiences.

The BRIN website also contained limited content specifically devoted to nuclear education and public campaigns. Although BRIN functions as an important institutional home for research and innovation, its public-facing communication did not appear to provide a sustained and easily identifiable stream of nuclear-related educational materials.

Institutional restructuring can affect the continuity of science communication. Research institutions may retain scientific expertise while weakening the media channels through which that expertise reaches the public. The issue therefore concerns communication infrastructure, institutional priorities, editorial continuity, and public-oriented content production.

HIMNI has the potential to bridge this gap through its network of nuclear scientists and activities such as webinars. However, the available evidence indicates that digital and popular-media activities remain limited and have not yet developed into a broad, systematic communication network.

6. DISCUSSION

The findings demonstrate that nuclear energy communication in Indonesia should be understood as a process of public meaning-making. Nuclear energy is not encountered by the public as a purely technical object. It is encountered through narratives that connect it with development, energy security, environmental responsibility, technological progress, and risk.

Scientists provide technical knowledge and may act as educators and communicators. Nevertheless, public meaning is also shaped by institutions, media organizations, communication technologies, and audiences. Scientific explanations become part of a wider environment in which institutional narratives, media selection, public concerns, and political priorities interact.

The findings also show that accessibility and completeness must be considered together. Scientific information needs to be translated into understandable language, but translation should not remove complexity that is socially important. A communication strategy that explains the benefits of nuclear energy without addressing uncertainty, risk, cost, and accountability may be accessible but incomplete. This also connects communication with public engagement, in which the public is not treated only as a recipient of information but as a participant in considering the implications of science and technology (Stilgoe et al., 2014).

A more comprehensive communication system would connect scientific expertise with accessible media production, public education, journalism, and opportunities

for dialogue, while providing room for different interpretations rather than a single predetermined narrative.

7. CONCLUSION

This chapter examined nuclear energy communication in Indonesia as a process through which scientific knowledge is translated, represented, circulated, and interpreted as a public issue. Using a qualitative case study of HIMNI, nuclear scientists, and Indonesian research institutions, the analysis identified four main patterns.

First, nuclear energy is commonly represented through scientific and developmental narratives that connect nuclear technology with energy security, technological progress, and national development. Second, nuclear scientists play an important role in translating technical knowledge into public-oriented explanations through webinars, media writing, and other communication activities. Third, communication tends to emphasize the potential benefits of nuclear technology, while uncertainty, contestation, and institutional responsibility receive less systematic visibility. Fourth, institutional changes from BATAN to BRIN have generated gaps in public communication, particularly through the discontinuation of NUTECH and the limited availability of nuclear educational content on institutional platforms.

The chapter argues that nuclear energy communication should move beyond the narrow objective of increasing public acceptance. Communication is a process through which nuclear energy becomes meaningful as a technological, environmental, economic, political, and developmental issue.

This reframing has implications for scientists, research institutions, media organizations, and policymakers. Public communication should combine scientific accuracy with accessibility while acknowledging uncertainty, risk, disagreement, and public concerns.

The chapter is based on a limited qualitative case involving nuclear scientists, institutional communication materials, and HIMNI activities. Further research could examine media coverage, compare institutional and journalistic representations, and investigate how different publics interpret nuclear narratives in relation to their experiences and values.

REFERENCES

Bauer, M. W., & Bucchi, M. (2008). *Journalism, science and society: Science communication between news and public relations* (Vol. 7). Routledge.

Bucchi, M. (2013). Style in science communication. *Public Understanding of Science*, *22*(8), 904–915.

Bucchi, M., & Trench, B. (2014). Science communication research: themes and challenges. In *Routledge handbook of public communication of science and technology* (pp. 17–30). Routledge.

Bultitude, K. (2011). *Science Communication–Why and How?*

Gregory, J., & Miller, S. (1998). *Science in public: Communication, culture, and credibility*. Plenum Press.

Kappel, K., & Holmen, S. J. (2019). Why science communication, and does it work? A taxonomy of science communication aims and a survey of the empirical evidence. *Frontiers in Communication*, *4*, 55.

Massagony, A., Pandit, R., & White, B. (2025). Political economy of energy policy in Indonesia towards net zero emissions by 2060. *Energy for Sustainable Development*, *88*, 101757.

Medvecky, F., & Leach, J. (2019). (Science) Communication as Ethics. In *An Ethics of Science Communication* (pp. 33–39). Springer.

Nielsen, K. H. (2022). Histories of Science Communication. *Histories*, *2*(3), 334–340.

Priest, S., Goodwin, J., & Dahlstrom, M. F. (2019). *Ethics and practice in science communication*. University of Chicago Press.

Rahmanta, M. A., Adhi, A. C., Tambunan, H. B., Digwijaya, W., Damanik, N., & Al Hasibi, R. A. (2023). An analysis of national position, opportunity, and challenge of indonesia's nuclear program to support net-zero emissions by 2060. *Energies*, *16*(24), 8089.

Rogers, E. M., Singhal, A., & Quinlan, M. M. (2014). Diffusion of innovations. In *An integrated approach to communication theory and research* (pp. 432–448). Routledge.

Santosa, J., Kuncoro, A. H., Dwijatmiko, A., Hesty, N. W., & Darmawan, A. (2023). *The role of nuclear power plants in indonesia towards net zero emissions (nze) in 2060 with a multi regions approach*.

Stilgoe, J., Lock, S. J., & Wilsdon, J. (2014). Why should we promote public engagement with science? *Public Understanding of Science*, *23*(1), 4–15.

Zulkifli, M. Y. (2026). *Educational Innovation in Science Communication: Enhancing Public Understanding of Environmentally Friendly Nuclear Technology in Indonesia.* 703–714. https://doi.org/10.22492/issn.2186-5892.2026.54

CAPÍTULO 12

ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO ACADÉMICO MEDIANTE TÉCNICAS ESTADÍSTICAS MULTIVARIANTES: UN ENFOQUE REPRODUCIBLE CON RMARKDOWN

Data de submissão: 26/08/2026
Data de aceite: 10/09/2026

Alberto Hananel Baigorria
Filiación Institucional: Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
Facultad de Ingeniería
Chiclayo, Lambayeque, Perú
https://orcid.org/0000-0003-4113-8623

RESUMEN: Este trabajo presenta el Question-Driven Reproducible Statistical Reasoning (QRSR), o Razonamiento Estadístico Reproducible Guiado por Preguntas, como un marco conceptual para organizar el análisis estadístico mediante preguntas metodológicas sucesivas. La propuesta se ilustra a partir de una experiencia docente desarrollada durante un seminario Erasmus+ en la Universidad de Vigo y de una base educativa compuesta por 150 observaciones y 29 variables. El recorrido integra exploración descriptiva, inferencia, análisis de varianza, regresión múltiple, mediación, modelos de ecuaciones estructurales, análisis factorial, análisis de componentes principales, análisis de conglomerados y Caras de Chernoff. A diferencia de una organización basada en un catálogo de técnicas, cada procedimiento se introduce como respuesta a una pregunta derivada de la evidencia disponible en la etapa anterior. RMarkdown proporciona la infraestructura computacional para integrar código, resultados e interpretación y favorecer la trazabilidad del proceso analítico. Se sostiene que la reproducibilidad científica requiere no solo la posibilidad de volver a ejecutar los cálculos, sino también documentar las decisiones metodológicas que conectan las preguntas con los procedimientos empleados. El caso muestra asimismo que la comunicación visual forma parte del razonamiento analítico, aunque no sustituye la inferencia estadística. El QRSR se plantea como un marco metodológico y docente flexible, cuya utilidad educativa requiere evaluación empírica posterior.
PALABRAS CLAVE: análisis multivariante; reproducibilidad; RMarkdown; razonamiento estadístico; Caras de Chernoff.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ¿POR QUÉ PASAR DE TÉCNICAS AISLADAS A UN FLUJO DE RAZONAMIENTO?

El análisis multivariante ocupa una posición central en la investigación cuantitativa porque numerosos fenómenos científicos no pueden comprenderse

adecuadamente examinando una variable cada vez. Variables académicas, clínicas, económicas, ambientales o sociales suelen estar relacionadas, comparten información y participan simultáneamente en los fenómenos que se desea estudiar. Técnicas como la regresión múltiple, el análisis factorial, el análisis de componentes principales, los modelos de ecuaciones estructurales y el análisis de conglomerados permiten abordar dimensiones diferentes de esta complejidad (Rencher & Christensen, 2012; Hair et al., 2019; Tabachnick & Fidell, 2022).

El problema pedagógico aparece cuando estas técnicas se enseñan como procedimientos independientes. El estudiante puede aprender una prueba , después ANOVA, luego regresión, más tarde análisis factorial y finalmente *clustering*, sin llegar necesariamente a comprender **qué pregunta justifica cada transición**. El conocimiento procedimental —saber ejecutar una función— no garantiza el conocimiento metodológico —saber por qué ese procedimiento constituye una respuesta apropiada al problema planteado—. Esta separación entre procedimiento y razonamiento motivó la organización del seminario como un recorrido analítico continuo, desde la comprensión inicial de los datos hasta su representación multivariante.

La reproducibilidad añade una segunda exigencia. Un análisis no es plenamente transparente si únicamente conserva sus resultados finales. Deben poder reconstruirse los datos de entrada, las transformaciones, las decisiones de modelización y, cuando sea posible, el entorno computacional. La literatura sobre investigación reproducible ha destacado la importancia de documentar el código, preservar los pasos intermedios, reducir las operaciones manuales irrepetibles y registrar el proceso mediante el cual se obtienen los resultados (Gentleman & Lang, 2007; Peng, 2011; Sandve et al., 2013). Los principios FAIR amplían esta perspectiva al promover que los objetos digitales científicos sean encontrables, accesibles, interoperables y reutilizables, dentro de las restricciones éticas y legales correspondientes (Wilkinson et al., 2016).

RMarkdown proporciona una infraestructura práctica para integrar parte de estas exigencias. Su lógica se vincula con la tradición de los documentos dinámicos y la programación literaria, al permitir que la explicación y el código que genera los resultados convivan en un mismo documento (Knuth, 1984; Xie, 2015; Xie et al., 2018). Esta integración no garantiza por sí misma una investigación reproducible: una decisión metodológica inadecuada puede ser perfectamente reproducible. Sin embargo, facilita la trazabilidad del proceso y reduce la distancia entre análisis, documentación y comunicación.

La estadística como proceso de decisiones.

Las técnicas estadísticas no constituyen el punto de partida del análisis. Cada procedimiento debe responder a una pregunta metodológica que justifique su utilización. Por ello, la pregunta inicial no debería ser "¿qué técnica conozco?", sino "¿qué necesito saber para responder rigurosamente al problema de investigación?".

Esta perspectiva permite distinguir entre **reproducir resultados** y **reconstruir el razonamiento**. En el primer caso, dos investigadores pueden ejecutar el mismo código y obtener las mismas cifras. En el segundo, además, es posible comprender por qué se eligió un procedimiento, qué supuestos se evaluaron, qué alternativas se consideraron, cómo se interpretaron los resultados y qué evidencia motivó la decisión siguiente. Este segundo nivel resulta especialmente relevante para la docencia, la auditoría metodológica y la revisión por pares.

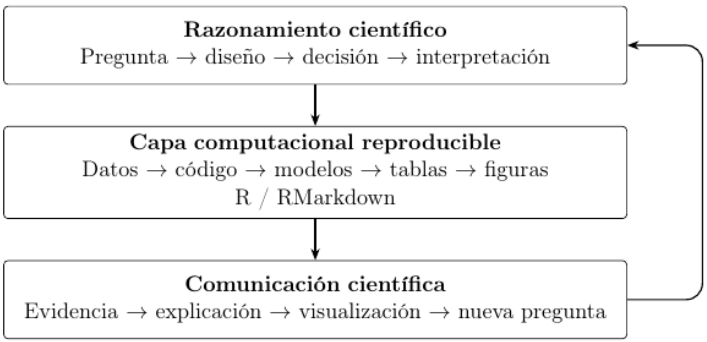
1.2. ¿CÓMO ORGANIZAR EL ANÁLISIS PARA QUE LA PREGUNTA PRECEDA A LA TÉCNICA?

El **Question-Driven Reproducible Statistical Reasoning (QRSR)** – en español, Razonamiento Estadístico Reproducible Guiado por Preguntas – se plantea como un **marco conceptual** para organizar el análisis estadístico, y no como un algoritmo, un estándar formal, un paquete de software o una metodología empíricamente validada. Su regla fundamental es sencilla: **cada técnica debe poder justificarse por la pregunta que pretende responder**.

En este sentido, el QRSR puede definirse como un marco metodológico para la investigación cuantitativa que organiza la selección e integración de técnicas estadísticas según la secuencia de preguntas científicas que emergen durante el proceso de análisis, procurando simultáneamente reproducibilidad computacional, coherencia metodológica e inteligibilidad de la comunicación científica.

Esta definición articula tres dimensiones. La primera corresponde al **razonamiento científico**, que conecta pregunta, diseño, supuestos, decisión metodológica e interpretación. La segunda es la **capa computacional reproducible**, encargada de registrar datos, código, transformaciones, modelos y resultados. La tercera corresponde a la **comunicación científica**, mediante la cual las salidas computacionales se transforman en argumentos que pueden ser examinados, interpretados y evaluados por otros investigadores.

Figura 1: Tres dimensiones del Question-Driven Reproducible Statistical Reasoning (QRSR).



Principios del QRSR. El marco se articula alrededor de cinco principios. Primero, **la pregunta precede a la técnica**: la disponibilidad de una función en R no constituye por sí misma una justificación metodológica. Segundo, **cada respuesta puede generar una nueva pregunta**, por lo que la secuencia analítica no está predeterminada de manera rígida. Tercero, **la reproducibilidad debe incluir el razonamiento** y no únicamente la reejecución de comandos. Cuarto, **la interpretación forma parte del análisis**, puesto que los coeficientes y demás resultados adquieren significado dentro del problema científico. Quinto, **la comunicación culmina y puede reiniciar el proceso**, ya que hacer comprensible un resultado constituye parte de la producción de conocimiento.

Fases del QRSR. Para facilitar su aplicación, estos principios se organizan en cuatro fases: **comprensión**, **explicación**, **descubrimiento** y **comunicación**. La fase de comprensión comprende la importación, el control de calidad, la descripción y la visualización inicial de los datos. La explicación incluye la comparación de grupos, la estimación de efectos, la regresión, la mediación y, cuando la teoría y el diseño lo justifican, los modelos estructurales. El descubrimiento incorpora procedimientos destinados a examinar estructuras multivariantes, como las correlaciones, la evaluación de factorizabilidad, el análisis factorial, el análisis de componentes principales y el agrupamiento. Finalmente, la comunicación transforma las estructuras identificadas en representaciones interpretables, sin confundir la visualización con evidencia inferencial independiente.

Tabla 1: Fases del QRSR y preguntas que organizan el recorrido analítico.

Fase QRSR	**Pregunta dominante**	**Procedimientos ilustrados en el caso**
Comprensión	¿Qué información tenemos y cómo se comporta?	Importación, control de estructura, estadística descriptiva y gráficos.
Explicación	¿Existen diferencias y qué variables pueden explicarlas?	Prueba , ANOVA, tamaño del efecto, regresión, mediación y SEM.

Fase QRSR	Pregunta dominante	Procedimientos ilustrados en el caso
Descubrimiento	¿Existe una estructura interna más simple?	Correlaciones, KMO, prueba de Bartlett, análisis paralelo, análisis factorial, ACP y *clustering*.
Comunicación	¿Cómo representar perfiles complejos sin ocultar su multidimensionalidad?	Perfiles de conglomerados y Caras de Chernoff.

Esta clasificación es deliberadamente flexible. Una regresión puede utilizarse con una finalidad predictiva y no explicativa; un ACP puede formar parte del preprocesamiento de un modelo posterior; y el *clustering* puede preceder a una fase confirmatoria. El QRSR no pretende establecer una taxonomía universal de las técnicas estadísticas, sino hacer explícito **para qué** se utiliza cada método dentro del razonamiento analítico.

Principio de razonamiento estadístico secuencial.

Toda técnica estadística debe surgir como una consecuencia metodológicamente razonable de la pregunta formulada a partir de la evidencia disponible en la etapa anterior.

El término "razonable" es deliberado: frente a una misma pregunta pueden existir alternativas paramétricas, robustas, no paramétricas, bayesianas o basadas en remuestreo. El QRSR no elimina el juicio profesional; exige que este sea **visible, justificable y reproducible**. En este sentido, la reproducibilidad no se limita a la posibilidad de volver a ejecutar los cálculos. También requiere documentar las decisiones que conectan las preguntas con los procedimientos utilizados, de manera que el código forme parte de un argumento científico comprensible (Gentleman & Lang, 2007; Sandve et al., 2013).

1.3. ¿EN QUÉ SE DIFERENCIA DE OTROS MARCOS?

El QRSR comparte antecedentes con diversas tradiciones vinculadas con la documentación computacional, la reproducibilidad y la organización del análisis de datos. La programación literaria integra narración y código con el propósito de hacer explícita la lógica de un programa (Knuth, 1984); la investigación reproducible enfatiza la preservación de los procedimientos necesarios para reconstruir los resultados (Gentleman & Lang, 2007; Peng, 2011; Sandve et al., 2013); y RMarkdown proporciona una infraestructura para integrar narrativa, código y resultados en documentos dinámicos (Xie et al., 2018).

Otros marcos organizan el propio proceso analítico. CRISP-DM estructura los proyectos de minería de datos mediante fases relacionadas con la comprensión del problema y de los datos, su preparación, el modelado, la evaluación y el despliegue, dentro de un proceso que admite iteraciones (Chapman et al., 2000; Shearer, 2000). SEMMA,

por su parte, organiza el análisis alrededor de las actividades de muestreo, exploración, modificación, modelización y evaluación.

Estas aproximaciones no se plantean aquí como competidoras. El QRSR se sitúa en una capa diferente: propone hacer explícita **la pregunta metodológica que justifica el paso de una técnica a la siguiente**. De este modo, la organización del análisis no depende únicamente de una secuencia de procedimientos, sino de la relación entre pregunta, decisión analítica, cálculo, interpretación y comunicación.

Tabla 2: Relación del QRSR con otros enfoques de organización y reproducibilidad del análisis.

Enfoque	**Unidad organizadora principal**	**Fortaleza central**	**Lugar del QRSR**
Programación literaria	Narrativa + programa	Hace explícita y legible la lógica del código.	QRSR traslada esta integración al razonamiento estadístico.
Investigación reproducible	Procedimiento computacional	Facilita la reconstrucción de cálculos y transformaciones.	QRSR incorpora además la justificación de las decisiones analíticas.
RMarkdown	Documento ejecutable	Integra texto, código y resultados.	Constituye una posible infraestructura para implementar QRSR.
CRISP-DM	Ciclo de proyecto de minería de datos	Organiza comprensión, preparación, modelado, evaluación y despliegue.	QRSR enfatiza las preguntas que justifican las decisiones estadísticas dentro del recorrido.
SEMMA	Secuencia de análisis de datos	Estructura actividades de exploración y modelización.	QRSR no prescribe una cadena operacional fija.
QRSR	**Pregunta científica o metodológica**	**Conecta decisión, cálculo, interpretación y comunicación.**	**Marco conceptual utilizado para organizar el recorrido analítico.**

Por tanto, sería metodológicamente excesivo afirmar que el QRSR inaugura la idea de un flujo reproducible o de una investigación iterativa. Su contribución se sitúa en la **integración explícita del razonamiento guiado por preguntas, la documentación computacional y la comunicación** como arquitectura para organizar el análisis estadístico. La evaluación del QRSR como estrategia educativa, por ejemplo frente a una enseñanza estructurada principalmente por técnicas, constituye una cuestión que requiere validación empírica.

2. METODOLOGÍA

2.1. CONTEXTO DOCENTE Y CONJUNTO DE DATOS

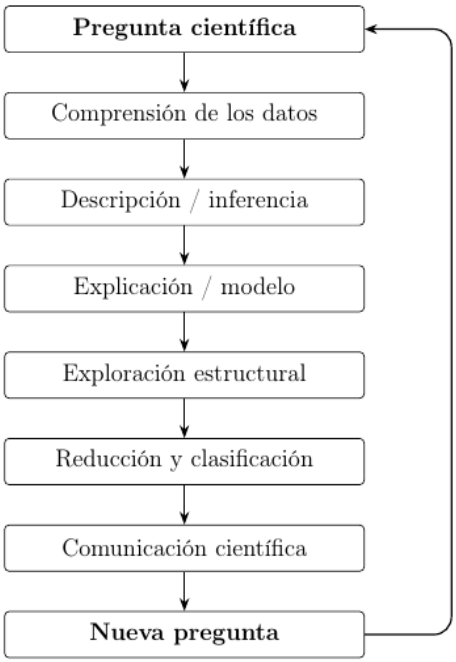
La experiencia que sirve de base para este recorrido se desarrolló durante una estancia Erasmus+ en la Universidad de Vigo y estuvo dirigida a estudiantes del

Doctorado Interuniversitario en Equidad e Innovación en Educación. El conjunto de datos utilizado con fines docentes contenía **150 observaciones y 29 variables**, de las cuales 26 eran numéricas y tres categóricas. Las variables incluían calificaciones, indicadores agregados de rendimiento, metodología docente y variables empleadas o derivadas en los análisis multivariantes posteriores.

Conviene precisar la naturaleza del caso. El propósito no es establecer causalmente la superioridad de una metodología docente ni generalizar los resultados a una población educativa externa. La base de datos funciona como **vehículo didáctico para construir y documentar un recorrido estadístico completo**. Esta delimitación evita atribuir al ejemplo pedagógico un alcance inferencial que su diseño no pretende sostener.

2.2. DISEÑO DEL RECORRIDO ANALÍTICO REPRODUCIBLE

Figura 2: Del problema científico a una nueva pregunta: lógica general del QRSR.



El elemento decisivo de la Figura 2 es la flecha de retorno. El análisis no se concibe como una secuencia lineal que termina necesariamente en una visualización, sino como un proceso iterativo. Un modelo puede revelar una anomalía que obligue a volver a los datos; un conglomerado puede sugerir nuevas hipótesis; y una representación visual puede hacer visible un patrón que requiera revisar nuevamente la información o

formular una nueva pregunta. El QRSR sitúa precisamente esa pregunta como elemento articulador de las transiciones entre las distintas etapas del recorrido.

2.3. ESTRATEGIA DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La estrategia analítica se organizó siguiendo la lógica secuencial del QRSR, de manera que cada procedimiento estadístico respondiera a una pregunta derivada de la etapa precedente. El recorrido combinó técnicas descriptivas, inferenciales y multivariantes, manteniendo una distinción entre los procedimientos orientados a examinar relaciones previamente planteadas y aquellos destinados a explorar estructuras emergentes en los datos.

En una primera etapa se examinó la estructura del conjunto de datos y se realizó una exploración descriptiva mediante medidas de tendencia central, dispersión y posición, complementadas con representaciones gráficas. La comparación del rendimiento entre metodologías se abordó mediante pruebas inferenciales para dos grupos y análisis de varianza, considerando previamente los supuestos correspondientes y complementando la significación estadística con la consideración de la magnitud de los efectos.

Posteriormente, se empleó regresión múltiple para examinar la asociación del rendimiento académico con la metodología y con variables de evaluación continua. A partir de las relaciones observadas se plantearon modelos de mediación y, posteriormente, un modelo de ecuaciones estructurales (SEM) para representar conjuntamente las vías directas e indirectas entre las variables consideradas. La interpretación de estos modelos se realizó en términos de asociaciones y estructuras compatibles con los datos, sin atribuirles por sí solos una interpretación causal.

La fase exploratoria multivariante comenzó con el examen de la matriz de correlaciones y la evaluación de su factorizabilidad mediante el índice de Kaiser–Meyer–Olkin (KMO) y la prueba de esfericidad de Bartlett. La determinación del número de factores se apoyó en el análisis paralelo, tras lo cual se aplicó análisis factorial exploratorio. De manera complementaria, se utilizó análisis de componentes principales (ACP) como procedimiento de reducción dimensional.

Finalmente, se aplicaron técnicas de análisis de conglomerados para explorar la existencia de perfiles multivariantes entre las observaciones. La estructura obtenida se examinó mediante criterios de cohesión y separación y se complementó con Caras de Chernoff como recurso de representación visual de los perfiles identificados. Estas representaciones se utilizaron con finalidad exploratoria y comunicativa, y no como procedimiento independiente de validación estadística.

Los análisis se desarrollaron en R y se documentaron mediante RMarkdown, integrando en un mismo flujo el código, las transformaciones, los modelos y sus correspondientes salidas. Esta organización permitió conservar la trazabilidad entre las preguntas formuladas, las decisiones metodológicas y los procedimientos empleados.

3. RESULTADOS

3.1. ¿QUÉ APRENDEMOS AL PASAR DE DESCRIBIR A EXPLICAR?

La primera pregunta del caso fue elemental y, precisamente por ello, imprescindible: **¿cómo son los datos?** La inspección inicial confirmó que la base utilizada en el seminario contenía 150 observaciones y 29 variables. Esta comprobación no tenía como finalidad producir una conclusión educativa, sino establecer el punto de partida del análisis, comprobar la codificación y detectar posibles inconsistencias antes de cualquier modelización.

Para ilustrar la exploración descriptiva se utilizó la calificación del primer examen. Se obtuvo una media de **12,42 puntos**, una desviación estándar de **2,51**, una mediana de **12,36**, un primer cuartil de **10,54** y un tercer cuartil de **14,07**, lo que corresponde a un rango intercuartílico aproximado de **3,53 puntos**. La proximidad entre media y mediana proporcionó una primera indicación sobre el equilibrio de la distribución, aunque por sí sola no permite establecer normalidad ni descartar la presencia de observaciones problemáticas. Por ello, los estadísticos descriptivos se complementaron con histogramas y diagramas de caja.

Este primer movimiento resume un principio que se mantiene durante todo el recorrido: **una cifra responde a una pregunta limitada**. La media informa sobre posición central; la desviación estándar, sobre dispersión; un histograma aporta información sobre la forma de la distribución; y un diagrama de caja facilita la identificación de observaciones alejadas. Ninguno de estos recursos sustituye a los demás.

3.1.1. ¿Existen diferencias entre metodologías?

Los estudiantes se clasificaron según metodología tradicional o innovadora, observándose descriptivamente un mayor rendimiento en el primer examen en el grupo correspondiente a la metodología innovadora. Antes de realizar la comparación inferencial se examinaron los supuestos correspondientes. Las pruebas de normalidad no proporcionaron evidencia suficiente para rechazar la normalidad en ninguno de los dos grupos, mientras que la comparación de varianzas produjo un valor de $p = 0.087$.

Posteriormente, la prueba t mostró una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos ($p < 0.001$), favorable al grupo correspondiente a la metodología innovadora.

Esta secuencia requiere, sin embargo, una precisión metodológica. Un valor p superior a 0.05 en una prueba de normalidad **no demuestra que los datos sean normales**; únicamente indica que, bajo las condiciones del contraste, no se encontró evidencia suficiente para rechazar dicha hipótesis. La robustez de los procedimientos depende además del diseño, los tamaños muestrales, la presencia de asimetrías, las observaciones influyentes y la magnitud de las desviaciones respecto de los supuestos. La prueba de Shapiro–Wilk constituye, por tanto, una herramienta diagnóstica y no un certificado automático de normalidad (Shapiro & Wilk, 1965).

Significación estadística no equivale a importancia práctica.

Un valor p pequeño informa sobre la incompatibilidad de los datos con una hipótesis nula bajo un modelo determinado; no cuantifica por sí mismo la relevancia educativa, clínica o científica de una diferencia. La interpretación debe incorporar el tamaño del efecto, los intervalos de confianza, la precisión, la calidad del diseño y el contexto sustantivo (Cohen, 1992).

El paso desde la prueba t hasta el análisis de varianza (ANOVA) no debe justificarse simplemente porque constituya "la técnica siguiente". Con dos grupos y bajo determinados supuestos, ambos procedimientos están estrechamente relacionados. En el seminario, el ANOVA permitió desplazar la pregunta desde una evaluación concreta hacia el **rendimiento académico global**, representado por el promedio final, e introducir de manera explícita la descomposición de la variabilidad y la consideración del tamaño del efecto.

Desde una perspectiva reproducible, los estadísticos inferenciales deben proceder directamente de la ejecución documentada del análisis. Cuando una salida exacta no se encuentra disponible, resulta metodológicamente preferible no reconstruir valores a partir de información parcial. Esta precaución evita que la narrativa científica complete lagunas mediante resultados inferidos del contexto.

3.1.2. ¿Qué variables se relacionan con el rendimiento?

La comparación entre grupos conduce de forma natural a una pregunta más rica. Saber que dos grupos difieren no permite determinar qué variables participan en el resultado. Para examinar esta cuestión se planteó un modelo de regresión múltiple en el que el promedio final se relacionó con la metodología, el primer examen y dos indicadores

de evaluación continua, AV_EX y AV_PA. La regresión múltiple permite estimar la asociación parcial de cada predictor con la variable respuesta manteniendo constantes los restantes predictores, bajo los supuestos correspondientes (Rencher & Christensen, 2012).

El resultado metodológicamente más relevante no fue un coeficiente aislado, sino un cambio en la interpretación: la asociación directa de la metodología con el rendimiento se atenuaba al incorporar AV_EX y AV_PA al modelo. Esta observación conduce a una nueva pregunta: **¿la metodología se relaciona directamente con el rendimiento final o parte de su asociación puede transmitirse a través del desempeño durante la evaluación continua?**

Este punto muestra por qué un flujo guiado por preguntas puede resultar más informativo que una colección de procedimientos. La pérdida o atenuación de significación de un predictor no implica automáticamente que "la variable dejó de importar". Puede ser compatible con diferentes explicaciones, entre ellas colinealidad, confusión, sobreajuste, insuficiente precisión, una redefinición del estimando o la presencia de un mecanismo mediado. La elección entre estas explicaciones debe sustentarse en la teoría, el diseño y el diagnóstico del modelo, y no únicamente en el cambio de un valor p.

3.1.3. ¿Existe un mecanismo indirecto?

El análisis de mediación formaliza la posibilidad de que la asociación entre una variable antecedente y un resultado opere a través de una o más variables intermedias. La literatura metodológica ha evolucionado desde reglas secuenciales basadas en la significación de regresiones hacia la evaluación directa de los efectos indirectos y de sus intervalos de confianza, frecuentemente mediante procedimientos de remuestreo (Baron & Kenny, 1986; Preacher & Hayes, 2008). Por ello, la existencia de un efecto indirecto no requiere necesariamente que todos los pasos de los procedimientos clásicos resulten estadísticamente significativos de manera aislada.

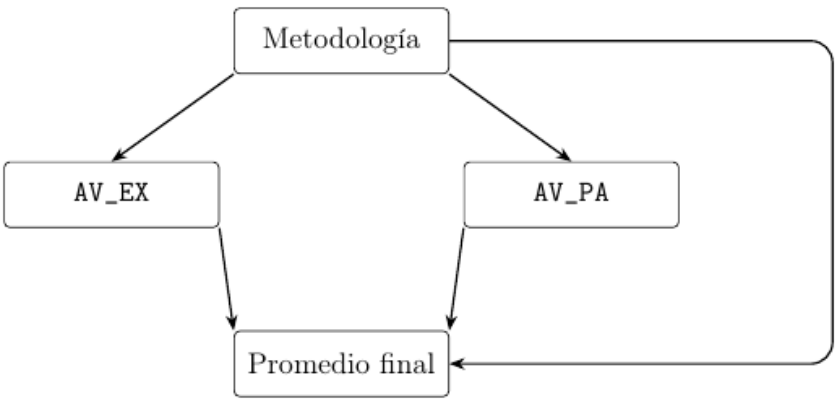
En el caso analizado, la hipótesis conceptual planteaba que la metodología podía relacionarse con AV_EX y AV_PA, y que estas variables, a su vez, podían relacionarse con el promedio final.

3.1.4. ¿Cómo integrar estas relaciones en un único modelo?

Los modelos de ecuaciones estructurales (SEM) permiten representar simultáneamente sistemas de relaciones entre variables observadas y, cuando corresponde, variables latentes. El paquete lavaan, ampliamente utilizado en R para este propósito, proporciona un entorno para la especificación y estimación de este tipo de modelos (Rosseel, 2012).

En el seminario se formuló un modelo en el que la metodología actúa como variable exógena, AV_EX y AV_PA como variables mediadoras, y el promedio final como variable resultado. El modelo incorpora, además, una vía directa entre metodología y promedio final. Conceptualmente, esta especificación permite representar el efecto total como la combinación de una vía directa y de vías indirectas transmitidas a través de las variables mediadoras.

Figura 3: Modelo conceptual utilizado para integrar efectos directos e indirectos.



El modelo permite examinar conjuntamente las relaciones de la metodología con las variables mediadoras, las asociaciones de estas con el rendimiento final y la vía directa entre metodología y promedio final. Una reducción de esta última al incorporar los mediadores puede ser compatible con un mecanismo de mediación; sin embargo, estas asociaciones no deben equipararse automáticamente con relaciones causales. La interpretación causal de los efectos directos e indirectos requiere supuestos adicionales relacionados con la temporalidad, la ausencia de confusión no medida, la correcta especificación del modelo y el diseño del estudio (Baron & Kenny, 1986; Preacher & Hayes, 2008).

En consecuencia, un SEM permite evaluar en qué medida una estructura hipotetizada es compatible con los datos, pero no transforma por sí mismo un diseño observacional o didáctico en un experimento causal. Del mismo modo, la evaluación del modelo no debería descansar en un único índice de ajuste. Índices como CFI, TLI, RMSEA y SRMR proporcionan información complementaria, y sus valores de referencia no deben convertirse en reglas mecánicas independientes del contexto, la especificación y la complejidad del modelo (Hu & Bentler, 1999; Kline, 2023).

Un modelo no es una réplica de la realidad.

Es una representación deliberadamente simplificada construida para responder determinadas preguntas. Un buen ajuste no demuestra que el modelo sea "verdadero", y un coeficiente estadísticamente significativo no sustituye la plausibilidad teórica, la calidad del diseño ni la evaluación de explicaciones alternativas.

Hasta este punto, el recorrido se ha orientado principalmente a describir, comparar y modelizar relaciones planteadas explícitamente. Sin embargo, una base multivariante permite formular otra clase de preguntas: **¿qué estructura emerge cuando dejamos de privilegiar una única variable respuesta?** Este cambio desplaza el análisis desde una lógica predominantemente explicativa hacia una lógica exploratoria de descubrimiento.

3.2. ¿QUÉ ESTRUCTURA MULTIVARIANTE PRESENTAN LOS DATOS Y CÓMO PUEDE RESUMIRSE?

La exploración multivariante comienza con el examen de la matriz de correlaciones aplicada a variables asociadas con la evaluación académica, entre ellas AV_EX, AV_TA, AV_PR, AV_PA, AV_AC, AV_VA y el promedio final. Las asociaciones positivas observadas entre buena parte de estas variables sugieren la existencia de **información compartida** y justifican examinar si la estructura de los datos puede representarse mediante un número menor de dimensiones.

¿Es factorizable la matriz? Antes de interpretar factores, es necesario evaluar si la estructura de correlaciones proporciona una base adecuada para la extracción de factores comunes. Para ello se consideran el índice de Kaiser–Meyer–Olkin (KMO) y la prueba de esfericidad de Bartlett. Esta última contrasta la hipótesis de que la matriz de correlaciones poblacional es una matriz identidad, mientras que el KMO evalúa la adecuación de la estructura de correlaciones a partir de la relación entre correlaciones simples y parciales (Bartlett, 1954; Kaiser, 1974; Kaiser & Rice, 1974).

Estos diagnósticos, sin embargo, no deben interpretarse como una autorización binaria del tipo "KMO > umbral = análisis factorial válido". La factorizabilidad debe valorarse conjuntamente con otros elementos, como el tamaño muestral, las comunalidades, el número de variables asociadas con cada factor, la magnitud de las cargas, la calidad de la medición y la plausibilidad conceptual de la solución.

¿Cuántos factores conservar? La determinación de la dimensionalidad constituye una de las decisiones más sensibles del análisis factorial. El criterio de autovalores superiores a uno y el *scree plot* de Cattell constituyen aproximaciones

clásicas, mientras que el análisis paralelo de Horn permite comparar los autovalores observados con los obtenidos a partir de datos aleatorios de estructura comparable (Horn, 1965; Cattell, 1966). En el análisis desarrollado, la función fa.parallel() se utilizó como apoyo para determinar el número de factores que debía conservarse.

¿Qué representan los factores? Una vez elegida la dimensionalidad, el análisis factorial intenta identificar patrones de covariación atribuibles a dimensiones comunes. La interpretación depende de la magnitud y estructura de las cargas, del método de extracción, de la rotación y del significado sustantivo de los indicadores. Una carga elevada no "nombra" automáticamente un factor; su denominación constituye una interpretación teórica que debe ser coherente con el conjunto de variables asociadas y, cuando sea posible, replicarse en otra muestra (Fabrigar et al., 1999; Costello & Osborne, 2005).

Aquí aparece una distinción importante entre el **análisis factorial** y el **análisis de componentes principales (ACP)**. Aunque ambos pueden producir representaciones de menor dimensión y a veces se confunden en la práctica, sus objetivos no son idénticos. El análisis factorial modeliza la varianza común en términos de variables latentes, mientras que el ACP construye combinaciones lineales de las variables originales para concentrar la varianza total en un conjunto de componentes ortogonales. El ACP constituye así una estrategia de reducción dimensional orientada a representar la mayor cantidad posible de variabilidad mediante un número reducido de componentes (Jolliffe, 2002; Jolliffe & Cadima, 2016).

La Tabla 3 sintetiza esta diferencia atendiendo a la pregunta que orienta cada procedimiento, la información que prioriza y el papel que desempeña dentro del recorrido analítico.

Tabla 3: Diferencias conceptuales entre el análisis factorial exploratorio y el análisis de componentes principales.

Aspecto	**Análisis factorial exploratorio**	**Análisis de componentes principales**
Pregunta central	¿Qué dimensiones comunes pueden explicar la covariación?	¿Cómo representar los datos con menos dimensiones?
Información priorizada	Varianza común	Varianza total
Resultado	Factores interpretables	Componentes lineales
Uso principal en el flujo	Comprender estructura latente	Síntesis, proyección y preparación para otros análisis

¿Cómo resumir sin perder la esencia? En sentido estricto, toda reducción dimensional puede implicar pérdida de información. Por ello, el objetivo del ACP no es

“reducir sin perder nada”, sino obtener una representación más parsimoniosa en la que la pérdida de información pueda cuantificarse y resulte aceptable para la finalidad del análisis. En el seminario, prcomp() se empleó para obtener los componentes principales y explorar si un número reducido de dimensiones permitía concentrar una proporción sustancial de la variabilidad de los datos (Jolliffe, 2002; Jolliffe & Cadima, 2016).

Reducir dimensionalidad no significa garantizar ausencia de pérdida.

Significa concentrar información relevante y disminuir redundancia de acuerdo con un criterio explícito. La calidad de la reducción debe evaluarse mediante la varianza retenida, la estabilidad de la solución y, sobre todo, su adecuación a la pregunta científica.

Este cambio de perspectiva modifica también la unidad de análisis conceptual. Mientras que el análisis factorial y el ACP se concentran fundamentalmente en la **estructura entre variables**, el análisis de conglomerados desplaza la pregunta hacia la **estructura entre individuos**.

3.3. ¿EXISTEN PERFILES DIFERENCIADOS EN LOS DATOS?

El *cluster analysis* busca identificar grupos internamente relativamente homogéneos y externamente diferenciados a partir de medidas de similitud o distancia. Sin embargo, no existe una partición “natural” garantizada para cualquier conjunto de datos: la solución depende de las variables seleccionadas, su escalado, la métrica de distancia, el algoritmo de agrupamiento y el criterio empleado para determinar el número de conglomerados (Kaufman & Rousseeuw, 1990; Everitt et al., 2011). La silueta de Rousseeuw proporciona, por ejemplo, una medida gráfica y numérica de cohesión y separación que permite valorar la calidad de una partición (Rousseeuw, 1987).

En el análisis desarrollado, la identificación de conglomerados permitió examinar perfiles diferenciados de estudiantes a partir de los patrones observados en las variables consideradas. Los individuos asignados a un mismo conglomerado presentaron configuraciones relativamente similares, mientras que las diferencias entre conglomerados permitieron explorar estructuras que no resultaban evidentes al considerar cada variable de manera aislada. La interpretación de estos perfiles debe vincularse, no obstante, a las decisiones analíticas que los originan, incluyendo la selección y estandarización de las variables, la métrica de distancia, el método de agrupamiento y el criterio utilizado para establecer el número de conglomerados.

Un conglomerado estadístico no es una categoría ontológica.

Encontrar tres, cuatro o cinco grupos mediante un algoritmo no demuestra que la población esté constituida naturalmente por esas categorías. Las agrupaciones son modelos descriptivos dependientes de decisiones analíticas. Su utilidad debe evaluarse mediante su estabilidad, separación, interpretabilidad y pertinencia científica.

3.4. ¿CÓMO COMUNICAR LOS PERFILES MULTIVARIANTES?

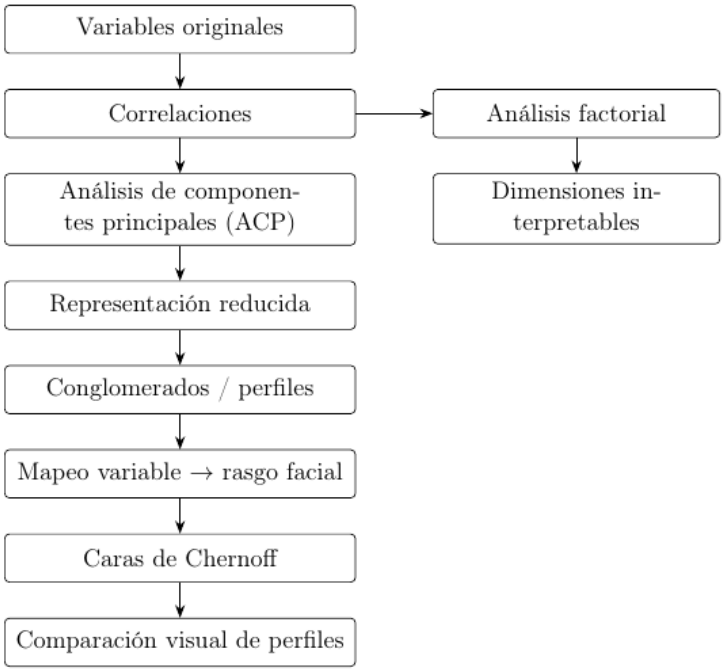
La visualización exploratoria ha ocupado históricamente un lugar esencial en el análisis de datos porque permite detectar estructuras que pueden pasar inadvertidas en tablas numéricas. Tukey defendió precisamente un enfoque exploratorio en el que las representaciones gráficas contribuyen a generar nuevas preguntas, y no únicamente a presentar resultados finales (Tukey, 1977).

Las **Caras de Chernoff** fueron propuestas por Herman Chernoff como una forma de representar observaciones multivariantes mediante rasgos faciales, asignando dimensiones numéricas a características como la forma de la cara, los ojos, la nariz o la boca. El método original permitía representar gráficamente puntos de hasta 18 dimensiones mediante un rostro (Chernoff, 1973).

En el seminario, esta técnica constituyó la culminación narrativa del recorrido: después de reducir, organizar y clasificar la información, los perfiles podían traducirse a un vocabulario visual. Los estudiantes pertenecientes a un mismo conglomerado presentaban configuraciones faciales relativamente similares, mientras que entre grupos podían observarse diferencias perceptibles. Esta correspondencia debe interpretarse con prudencia: las caras *ilustran* la estructura obtenida y pueden ser congruentes con ella, pero no constituyen una validación independiente del *clustering*.

Más aún, la asignación de variables a rasgos faciales no es neutral. Chernoff y Rizvi mostraron experimentalmente que permutar las variables que controlan determinados rasgos puede modificar el desempeño de una tarea de clasificación visual. Este resultado obliga a documentar explícitamente el mapeo entre variables y rasgos y desaconseja tratar las caras como una representación objetiva e invariante de los datos (Chernoff & Rizvi, 1975).

Figura 4: Del espacio multivariante a la identificación y representación visual de perfiles.



Una imagen no reemplaza un análisis estadístico.

Las Caras de Chernoff pueden facilitar la exploración y la comunicación de perfiles multidimensionales, pero su apariencia depende de la transformación de escalas y de la asignación de variables a rasgos faciales. Deben utilizarse como complemento interpretativo, no como evidencia confirmatoria independiente (Chernoff, 1973; Chernoff & Rizvi, 1975).

La culminación visual del recorrido adquiere, por tanto, mayor valor cuando se interpreta con cautela. Su interés no reside en afirmar que un rostro "demuestra" la existencia de un grupo, sino en facilitar la exploración y comunicación de patrones multivariantes cuya validez debe sustentarse en el análisis estadístico.

4. DISCUSIÓN

4.1. APORTACIONES DEL QRSR

La principal aportación del QRSR es metodológica: transforma una secuencia extensa de técnicas en una narrativa de decisiones articulada por preguntas. La progresión desde la descripción y la inferencia hasta la regresión, la mediación, los

modelos de ecuaciones estructurales, la exploración de estructuras latentes, la reducción dimensional, el agrupamiento y la visualización deja de entenderse como una sucesión de procedimientos y pasa a concebirse como un recorrido en el que cada resultado puede justificar una nueva pregunta. El hilo conductor no es, por tanto, RMarkdown ni una técnica concreta, sino la pregunta que hace necesario cada movimiento analítico.

Esta organización tiene una consecuencia pedagógica relevante. En lugar de memorizar qué procedimiento aplicar, el estudiante debe reconocer primero el tipo de incertidumbre que enfrenta: si necesita describir, comparar, estimar una asociación ajustada, examinar un posible mecanismo indirecto, representar un sistema de relaciones, explorar dimensiones comunes, reducir redundancia o identificar perfiles. La pregunta conduce a una familia de herramientas y, posteriormente, a la evaluación de las condiciones bajo las cuales un método concreto resulta apropiado.

Una segunda aportación consiste en ampliar el concepto operativo de reproducibilidad. La investigación reproducible ha destacado la importancia de conservar código, datos y contexto computacional, así como de reducir intervenciones manuales que separan el análisis de su comunicación (Gentleman & Lang, 2007; Peng, 2011; Sandve et al., 2013). RMarkdown resulta especialmente adecuado para este propósito porque permite que tablas, figuras y resultados sean generados a partir del mismo código que implementa los análisis. El QRSR añade a esta trazabilidad una exigencia adicional: documentar también **por qué** se ejecutó cada procedimiento y qué evidencia justificó la decisión siguiente.

Una tercera aportación es incorporar la comunicación como parte del propio análisis. La investigación estadística no concluye necesariamente cuando aparece una salida computacional; todavía es necesario evaluar si la evidencia puede interpretarse, examinarse y comunicarse sin distorsionar sus límites. La literatura sobre percepción gráfica ha mostrado que distintas representaciones no poseen necesariamente la misma eficacia para comunicar cantidades y patrones (Cleveland & McGill, 1984). La visualización constituye, por ello, una decisión metodológica y no únicamente estética.

Esta perspectiva puede resumirse como una conversación disciplinada con los datos. Primero se pregunta qué información está disponible; después, qué patrones aparecen; posteriormente, si las diferencias observadas son compatibles con la variabilidad esperable; a continuación, qué variables permiten comprenderlas; más tarde, si existe una estructura multivariante que no era visible inicialmente; y, finalmente, cómo comunicarla. El valor de cada etapa reside tanto en la respuesta obtenida como en la calidad de la pregunta que permite formular después.

Las herramientas concretas pueden cambiar. RMarkdown puede ser sustituido o complementado por Quarto, Jupyter u otros entornos; los paquetes estadísticos evolucionarán y nuevas técnicas se incorporarán al repertorio del investigador. El principio metodológico permanece: **la herramienta debe estar subordinada al problema científico**.

4.2. IMPLICACIONES METODOLÓGICAS Y DOCENTES

Desde una perspectiva docente, el QRSR permite organizar las actividades alrededor de problemas en lugar de hacerlo exclusivamente mediante nombres de procedimientos. Una sesión dedicada tradicionalmente a "ANOVA", por ejemplo, puede formularse a partir de la pregunta sobre si las diferencias entre grupos son mayores de lo esperable por azar y cuál es su magnitud. Del mismo modo, una actividad sobre ACP puede plantearse como la necesidad de representar muchas variables mediante un número reducido de dimensiones conservando una cantidad suficiente de información. Este cambio modifica el orden cognitivo: primero aparece el problema y después la herramienta.

Para la investigación aplicada, un documento reproducible podría estructurar cada bloque analítico alrededor de cuatro elementos mínimos: **pregunta, decisión, evidencia y consecuencia**. Esta organización es suficientemente general para implementarse mediante RMarkdown, Quarto, Jupyter u otros sistemas, por lo que el QRSR no depende técnicamente de una plataforma específica. Su elemento esencial es preservar la relación entre narrativa, decisión metodológica y cómputo.

Las implicaciones se extienden también a la ciencia abierta. Cuando la ética, la confidencialidad y las licencias lo permiten, un análisis reproducible puede acompañarse de datos, scripts, diccionarios de variables, versiones de paquetes y archivos que documenten el entorno computacional. Los principios FAIR y las recomendaciones para investigación computacional reproducible favorecen precisamente la trazabilidad y reutilización de los objetos de investigación (Wilkinson et al., 2016; Sandve et al., 2013).

4.3. LIMITACIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El QRSR presenta varias limitaciones que deben considerarse al interpretar su alcance. En primer lugar, la secuencia propuesta tiene una finalidad metodológica y pedagógica, pero no pretende constituir un orden universal de análisis. Un estudio confirmatorio preregistrado puede comenzar directamente con un modelo definido *a priori*; un análisis predictivo puede requerir validación cruzada y evaluación fuera de

muestra; y un diseño experimental puede exigir separar estrictamente las decisiones confirmatorias de las exploraciones posteriores. El QRSR debe adaptarse a estas situaciones y no sustituirlas.

En segundo lugar, la idea de que cada respuesta puede generar una nueva pregunta no debe interpretarse como una autorización para realizar análisis *post hoc* ilimitados. Cuantas más decisiones se adoptan sobre los mismos datos, mayor es la necesidad de distinguir entre hipótesis confirmatorias y hallazgos exploratorios, documentarlas, considerar la multiplicidad y, cuando sea posible, validar los resultados con información independiente.

En tercer lugar, los términos explicación, mediación y causalidad requieren especial cautela. Ni la regresión, ni el análisis de mediación, ni los modelos de ecuaciones estructurales transforman por sí mismos una asociación en un efecto causal. La interpretación causal depende del diseño, la temporalidad, la medición y los supuestos identificadores. En un conjunto de datos utilizado primordialmente con finalidad docente, resulta más adecuado hablar de relaciones compatibles con determinados mecanismos hipotéticos que afirmar que una metodología produce causalmente un cambio en el rendimiento.

En cuarto lugar, la reducción dimensional, el agrupamiento y la representación mediante Caras de Chernoff dependen de decisiones analíticas. La estandarización de las variables puede modificar las distancias; la selección de componentes puede alterar una partición; distintos algoritmos pueden producir soluciones diferentes; y cambios en la asignación de variables a rasgos faciales pueden modificar la percepción de los perfiles. La reproducibilidad permite hacer visibles estas decisiones, pero no elimina su influencia.

Finalmente, el QRSR continúa siendo un marco conceptual derivado de una experiencia docente. El presente trabajo no aporta una comparación experimental que permita concluir que la enseñanza organizada mediante QRSR mejora la comprensión, la transferencia o la capacidad de seleccionar procedimientos frente a otros enfoques. Su validación educativa constituye, por tanto, una línea futura prioritaria.

El desarrollo posterior del marco puede avanzar en varias direcciones: comparar empíricamente el aprendizaje guiado por preguntas con secuencias tradicionales; extender el recorrido a modelos generalizados, métodos robustos, remuestreo, clasificación supervisada y validación predictiva; fortalecer la reproducibilidad mediante entornos versionados, pruebas automatizadas y repositorios archivables; y estudiar cómo las diferentes representaciones multivariantes afectan a la comprensión e interpretación de perfiles.

5. CONCLUSIONES

El caso desarrollado durante el seminario Erasmus+ muestra que el análisis estadístico puede enseñarse y documentarse como un proceso continuo de construcción de evidencia en lugar de como una sucesión de técnicas inconexas. La descripción proporcionó la primera comprensión de los datos; la inferencia permitió examinar diferencias; la regresión transformó la comparación en una pregunta explicativa; la mediación y el SEM hicieron explícita una estructura hipotética de relaciones; el análisis factorial y el ACP exploraron dimensiones y representaciones más parsimoniosas; el clustering desplazó la atención hacia perfiles de individuos; y las Caras de Chernoff cerraron el recorrido mediante una representación visual multivariante.

La contribución conceptual del Question-Driven Reproducible Statistical Reasoning consiste en organizar esta progresión alrededor de preguntas. No se propone una técnica nueva ni un sustituto de los marcos de ciencia de datos existentes. Se propone una regla de disciplina metodológica: ningún procedimiento debería aparecer en el análisis sin que el lector pueda reconocer qué pregunta pretende responder y qué evidencia justificó avanzar hacia él.

RMarkdown desempeña un papel instrumental importante porque reúne narración y computación en el mismo artefacto. No obstante, el principio es independiente de la tecnología. Un QRSR podría implementarse mediante Quarto, Jupyter o cualquier sistema que permita conservar de forma fiable datos, código, resultados, documentación y versiones. Lo permanente no es el archivo .Rmd; es la trazabilidad del razonamiento.

La experiencia también obliga a redefinir la reproducibilidad. Volver a obtener la misma tabla es necesario, pero insuficiente. Un investigador debe poder conocer por qué se eligieron esas variables, por qué se evaluó determinado supuesto, por qué una pérdida de significación llevó a examinar una mediación, por qué se eligió una estrategia de reducción y cómo se tradujeron perfiles numéricos en rasgos visuales. Reproducir un análisis significa también poder reconstruir su arquitectura intelectual.

6. AGRADECIMIENTOS

Este capítulo de libro constituye un resultado de investigación derivado de las actividades académicas desarrolladas en la Universidad de Vigo (España), en el marco de una movilidad docente Erasmus+ del autor, bajo su filiación institucional con la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo (USAT, Perú). El trabajo se desarrolló en el contexto del seminario Análisis multivariante de datos en investigación educativa mediante software libre, impartido en el Doctorado Interuniversitario en Equidad e Innovación en Educación.

REFERENCIAS

Baron, R. M., & Kenny, D. A. (1986). The moderator–mediator variable distinction in social psychological research: Conceptual, strategic, and statistical considerations. Journal of Personality and Social Psychology, 51 (6), 1173-1182. https://doi.org/10.1037/0022-3514.51.6.1173

Bartlett, M. S. (1954). A note on the multiplying factors for various χ2 approximations. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), 16 (2), 296-298. https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1954.tb00174.x

Cattell, R. B. (1966). The scree test for the number of factors. Multivariate Behavioral Research, 1 (2), 245-276. https://doi.org/10.1207/s15327906mbr0102_10

Chapman, P., Clinton, J., Kerber, R., Khabaza, T., Reinartz, T., Shearer, C., & Wirth, R. (2000). CRISP-DM 1.0: Step-by-Step Data Mining Guide (inf. téc.). SPSS. Chicago.

Chernoff, H. (1973). The use of faces to represent points in k-dimensional space graphi- cally. Journal of the American Statistical Association, 68 (342), 361-368. https://doi.org/10.1080/01621459.1973.10482434

Chernoff, H., & Rizvi, M. H. (1975). Effect on classification error of random permutations of features in representing multivariate data by faces. Journal of the American Statistical Association, 70 (351a), 548-554. https://doi.org/10.1080/01621459.1975.10482470

Cleveland, W. S., & McGill, R. (1984). Graphical perception: Theory, experimentation, and application to the development of graphical methods. Journal of the American Statistical Association, 79 (387), 531-554. https://doi.org/10.1080/01621459.1984.

Cohen, J. (1992). A power primer. Psychological Bulletin, 112 (1), 155-159. https://doi.org/10.1037/0033-2909.112.1.155

Costello, A. B., & Osborne, J. W. (2005). Best practices in exploratory factor analysis: Four recommendations for getting the most from your analysis. Practical Assess- ment, Research & Evaluation, 10 (7). https://doi.org/10.7275/jyj1-4868

Everitt, B. S., Landau, S., Leese, M., & Stahl, D. (2011). Cluster Analysis (5.a ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470977811

Fabrigar, L. R., Wegener, D. T., MacCallum, R. C., & Strahan, E. J. (1999). Evalua- ting the use of exploratory factor analysis in psychological research. Psychological Methods, 4 (3), 272-299.

Gentleman, R., & Lang, D. T. (2007). Statistical analyses and reproducible research. Journal of Computational and Graphical Statistics, 16 (1), 1-23. https://doi.org/10.1198/106186007X178663

Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). Multivariate Data Analysis (8.a ed.). Cengage.

Horn, J. L. (1965). A rationale and test for the number of factors in factor analysis. Psychometrika, 30 (2), 179-185. https://doi.org/10.1007/BF02289447

Hu, L.-t., & Bentler, P. M. (1999). Cutoff criteria for fit indexes in covariance struc- ture analysis: Conventional criteria versus new alternatives. Structural Equation Modeling, 6 (1), 1-55. https://doi.org/10.1080/10705519909540118

Jolliffe, I. T. (2002). Principal Component Analysis (2.a ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/b98835

Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and re- cent developments. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 374 (2065), 20150202. https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202

Kaiser, H. F. (1974). An index of factorial simplicity. Psychometrika, 39 (1), 31-36. https://doi.org/10.1007/BF02291575

Kaiser, H. F., & Rice, J. (1974). Little Jiffy, Mark IV. Educational and Psychological Measurement, 34 (1), 111-117. https://doi.org/10.1177/001316447403400115

Kaufman, L., & Rousseeuw, P. J. (1990). Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470316801

Kline, R. B. (2023). Principles and Practice of Structural Equation Modeling (5.a ed.). Guilford Press.

Knuth, D. E. (1984). Literate programming. The Computer Journal, 27 (2), 97-111. https://doi.org/10.1093/comjnl/27.2.97

Peng, R. D. (2011). Reproducible research in computational science. Science, 334 (6060), 1226-1227. https://doi.org/10.1126/science.1213847

Preacher, K. J., & Hayes, A. F. (2008). Asymptotic and resampling strategies for assessing and comparing indirect effects in multiple mediator models. Behavior Research Methods, 40 (3), 879-891. https://doi.org/10.3758/BRM.40.3.879

Rencher, A. C., & Christensen, W. F. (2012). Methods of Multivariate Analysis (3.a ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118391686

Rosseel, Y. (2012). lavaan: An R package for structural equation modeling. Journal of Statistical Software, 48 (2), 1-36. https://doi.org/10.18637/jss.v048.i02

Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. Journal of Computational and Applied Mathematics, 20, 53-65. https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7

Sandve, G. K., Nekrutenko, A., Taylor, J., & Hovig, E. (2013). Ten simple rules for re- producible computational research. PLoS Computational Biology, 9 (10), e1003285. https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1003285

Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika, 52 (3–4), 591-611. https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591

Shearer, C. (2000). The CRISP-DM model: The new blueprint for data mining. Journal of Data Warehousing, 5 (4), 13-22.

Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2022). Using Multivariate Statistics (7.a ed.). Pearson.

Tukey, J. W. (1977). Exploratory Data Analysis. Addison-Wesley.

Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J.-W., da Silva Santos, L. B., Bourne, P. E., et al. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. Scientific Data, 3, 160018. https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18

Xie, Y. (2015). Dynamic Documents with R and knitr (2.a ed.). Chapman & Hall/CRC.

Xie, Y., Allaire, J. J., & Grolemund, G. (2018). R Markdown: The Definitive Guide. Chapman & Hall/CRC.

CAPÍTULO 13

EL PODCAST EDUCATIVO COMO DISPOSITIVO DE AUDIO-MEDIACIÓN PARA EL DESARROLLO SOCIOEMOCIONAL DOCENTE: ARQUITECTURA, MODELO ECOS Y CONSIDERACIONES ÉTICAS PARA EL DISEÑO DE APPS DE PODCAST SEL

Data de submissão: 10/08/2026
Data de aceite: 06/09/2026

Felipe Albarrán-Torres
Depto. de Ciencias Básicas y Morfología
Facultad de Medicina
Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile
https://orcid.org/0000-0002-6927-4291

Paula Correa-Gutiérrez
Estudiante Programa de Doctorado en Innovación Educativa
Facultad de Educación
Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile
https://orcid.org/0009-0009-0484-639X

Fabiola Sáez-Delgado
Research and Innovation Group in Socioemotional Learning Well-Being and Mental Health to Foster Thriving (THRIVE4ALL)
Facultad de Educación
Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile
https://orcid.org/0000-0002-7993-5356

Pilar Jara-Coatt
Research and Innovation Group in Socioemotional Learning Well-Being and Mental Health to Foster Thriving (THRIVE4ALL)
Facultad de Educación
Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile
https://orcid.org/0000-0002-9975-8713

Natalia Zañartu-Canihuante
Facultad de Ciencias Sociales y Educación
Escuela de Psicología
Universidad Santo Tomás Chile
https://orcid.org/0000-0003-3434-9721

RESUMEN: Este capítulo analiza el podcast educativo como dispositivo de audio-mediación para el fortalecimiento de las competencias socioemocionales (CSE) docentes y la mitigación del desgaste profesional, en un escenario de creciente deterioro de la salud mental del profesorado y de barreras estructurales de tiempo para participar en formación tradicional. Se sistematiza evidencia empírica sobre el uso de podcasts y recursos de audio en la formación docente, y se ancla el diseño de contenidos en modelos validados de CSE (EHSED-30, SEMS-IT). Como aporte central, se propone el Modelo ECOS: Estructura pedagógica, Componentes de autorregulación, Orientación comunitaria y Seguridad/ética, una taxonomía de cuatro dimensiones que se traduce en una arquitectura tecnológica de cinco capas y en una lista de verificación práctica, orientadas a equipos de desarrollo, investigadores y responsables de política educativa que diseñen o evalúen aplicaciones de podcast socioemocional. El capítulo discute también las implicancias psicológicas y éticas del formato (vínculos parasociales, consentimiento

informado, sesgo algorítmico, sobrecarga atencional, equidad de género y accesibilidad), así como la viabilidad y sostenibilidad de esta tecnología para escuelas y Servicios Locales de Educación Pública (SLEP).
PALABRAS CLAVE: podcast educativo; competencias socioemocionales docentes; audio-mediación; bienestar docente; Modelo ECOS; ética del diseño tecnológico.

THE EDUCATIONAL PODCAST AS A TOOL FOR AUDIO-MEDIATION IN TEACHERS' SOCIO-EMOTIONAL DEVELOPMENT: ARCHITECTURE, THE ECOS MODEL, AND ETHICAL CONSIDERATIONS FOR THE DESIGN OF SEL PODCAST APPS

ABSTRACT: This chapter examines educational podcasting as an audio-mediation device for strengthening teachers' social-emotional competencies (SEC) and mitigating professional burnout, against a backdrop of worsening teacher mental health and structural time barriers to traditional training. It synthesizes empirical evidence on the use of podcasts and audio resources in teacher training and grounds content design in validated SEC models (EHSED-30, SEMS-IT). As its central contribution, the chapter proposes the ECOS Model: Pedagogical Structure, Self-regulation Components, Community Orientation, and Security/Ethics, a four-dimension taxonomy translated into a five-layer technological architecture and a practical verification checklist for development teams, researchers, and policymakers designing or evaluating socioemotional podcast applications. The chapter also discusses the psychological and ethical implications of the format (parasocial bonds, informed consent, algorithmic bias, attentional overload, gender equity, and accessibility), along with the feasibility and sustainability of this technology for schools and Local Public Education Services (SLEP, for its Spanish acronym).
KEYWORDS: educational podcast; teachers' social-emotional competencies; audio-mediation; teacher well-being; ECOS Model; ethics of technology design.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. LA SALUD MENTAL DOCENTE Y LA URGENCIA DE NUEVAS VÍAS DE FORMACIÓN SOCIOEMOCIONAL

La profesión docente atraviesa, a nivel global y particularmente en Chile, un escenario de creciente deterioro de la salud mental, caracterizado por el aumento sostenido de licencias médicas de origen psicológico, el desgaste profesional (*burnout*) y la erosión del bienestar subjetivo del profesorado (Concha-Herrera et al., 2025; Jara-Coatt et al., 2025b; Sáez-Delgado et al., 2023). Este fenómeno no es privativo de un nivel educativo ni de un tipo de dependencia institucional: afecta transversalmente a docentes de educación básica y media, y se agudiza en contextos de alta vulnerabilidad social, alta carga administrativa y baja disponibilidad de redes de apoyo (Baeza-Sepúlveda et al., 2026a; Ojeda-Rodríguez et al., 2026). En este marco, las competencias socioemocionales (CSE) docentes, entendidas como el conjunto de habilidades de autoconciencia,

autorregulación, conciencia social, habilidades relacionales y toma de decisiones responsables aplicadas al ejercicio profesional, han sido identificadas como un factor protector robusto frente al estrés laboral crónico y como un predictor de la calidad de la enseñanza y del clima de aula (Lozano-Peña et al., 2021, 2022).

La evidencia acumulada durante la última década muestra que las intervenciones orientadas a fortalecer las CSE docentes son efectivas, pero enfrentan una barrera estructural: su implementación suele depender de formatos presenciales, sincrónicos y de alta exigencia horaria, lo que las hace poco sostenibles para un profesorado que ya reporta sobrecarga (Lozano-Peña et al., 2023). Revisiones sistemáticas recientes confirman que los programas de entrenamiento en CSE producen mejoras significativas en la regulación emocional, la autoeficacia y las estrategias de afrontamiento, tanto en poblaciones docentes generales como en subgrupos con necesidades específicas, por ejemplo, en intervenciones dirigidas a adolescentes con diagnóstico del espectro autista, donde los efectos del entrenamiento socioemocional han sido documentados con metodologías equivalentes (Contreras et al., 2023), lo que sugiere que el modelo de intervención es transferible entre contextos siempre que se adapte el vehículo de entrega. Para responder a esta necesidad, el campo ha avanzado en la construcción y validación de instrumentos que permiten medir con precisión las CSE docentes, tales como la Escala de Habilidades Socioemocionales Docentes (EHSED-30) (Lozano-Peña et al., 2026) y el *SocioEmotional Skills Instrument for Teachers* (SEMS-IT), validado mediante un enfoque de análisis de redes en español e inglés (Sáez-Delgado et al., 2024). Estos avances psicométricos constituyen la base empírica que permite, más adelante en este capítulo, diseñar contenidos de podcast alineados con dimensiones de CSE efectivamente medibles y no con nociones intuitivas de bienestar.

1.2. EL PODCAST EDUCATIVO COMO TECNOLOGÍA DE AUDIO-MEDIACIÓN EMERGENTE

Como señalan Correa-Gutiérrez et al., (2026) en su obra *Hacia un ejercicio profesional próspero*, la construcción de un desempeño docente sostenible no depende únicamente de la adquisición teórica de conceptos, sino de la habilitación de espacios cotidianos de autorreflexión y resignificación de la práctica pedagógica. Ante este desafío, las tecnologías de audio portátil, y en específico el podcast educativo, emergen como un dispositivo de mediación pedagógica de frontera que aprovecha la ubicuidad de los *smartphones* para transformar el tiempo fragmentado (desplazamientos, pausas y transiciones) en oportunidades de bienestar y crecimiento profesional (Reupert & Dalgarno, 2011; Sáez-Delgado et al., 2025).

El auge del podcast como recurso formativo no es un fenómeno aislado, sino parte de una transformación más amplia de los ecosistemas de aprendizaje continuo mediados por tecnologías móviles y por inteligencia artificial (IA). Investigaciones recientes sobre aprendizaje a lo largo de la vida en contextos de IA sugieren que la asistencia algorítmica, la personalización de contenidos y la automatización de tareas formativas, cuando se diseñan con criterios pedagógicos explícitos, pueden optimizar significativamente la pertinencia y la adherencia a los programas de formación docente (Arias et al., 2025; Rodríguez et al., 2026). En este escenario, tecnologías emergentes como las aulas inteligentes basadas en IA e Internet de las Cosas (IoT) (Quevedo Piratova et al., 2025) comparten con el podcast educativo un mismo principio de diseño: reducir la fricción de acceso y aumentar la pertinencia contextual del aprendizaje, trasladando el centro de gravedad formativo desde la sala de clases hacia los espacios cotidianos del profesorado.

1.3. DE LA ESCUCHA A LA APLICACIÓN: HACIA ECOSISTEMAS DIGITALES INTEGRALES DE PODCAST SOCIOEMOCIONAL

Si bien el podcast como formato sonoro autónomo ha demostrado beneficios formativos (Haleem et al., 2022), su potencial se multiplica cuando se integra en una aplicación móvil que combine la narrativa auditiva con componentes interactivos de autorregulación, comunidad de pares y personalización adaptativa. La literatura sobre calidad de plataformas digitales educativas, incluyendo estándares internacionales como ISO 25010, aplicados a la evaluación comparativa de mundos virtuales y entornos digitales de aprendizaje (Sáez-Delgado et al., 2026e), ofrece un marco de referencia útil para especificar qué debe cumplir técnicamente una aplicación de podcast socioemocional. Al mismo tiempo, los estudios sobre personalización mediada por IA advierten sobre el riesgo de anclar el diseño en “neuromitos” de estilos de aprendizaje en lugar de en evidencia validada (Escobar-Casallas et al., 2026), y sobre la necesidad de que la IA aplicada a la formación docente sea explícitamente inclusiva (Barajas Motta et al., 2025). Estas tensiones entre personalización, evidencia y equidad constituyen el punto de partida de la arquitectura y la taxonomía que se desarrollan en la sección 4 de este capítulo.

A partir de este contexto, el presente capítulo persigue un doble propósito. En primer lugar, analiza el fundamento teórico y empírico del podcast como dispositivo de audio-mediación para el fortalecimiento de las CSE docentes y la mitigación del desgaste profesional, sistematizando la evidencia disponible en la materia. En segundo lugar, y como aporte distintivo respecto de la literatura previa, propone una arquitectura

tecnológica en capas, una taxonomía de componentes fundamentales denominada Modelo ECOS (Estructura, Componentes de autorregulación, Orientación comunitaria y Seguridad/ética) y una lista de verificación asociada, orientadas a equipos de desarrollo, investigadores y responsables de política educativa que deseen diseñar o evaluar aplicaciones de podcast para el desarrollo socioemocional docente. El capítulo cierra con una discusión sobre la viabilidad, sostenibilidad, límites éticos e implicancias prácticas de esta tecnología para los sistemas escolares y los Servicios Locales de Educación Pública (SLEP).

Objetivo General: Analizar el rol del podcast educativo como una tecnología móvil de audio-mediación accesible, flexible y de baja fricción cognitiva para el fortalecimiento de las competencias socioemocionales (CSE) y la mitigación del desgaste profesional en el profesorado, proponiendo además una arquitectura tecnológica y una taxonomía de componentes que orienten el diseño de aplicaciones de podcast socioemocional docente.

Objetivos Específicos:

1. Examinar el fundamento del aprendizaje auditivo situado y su articulación con los modelos de prosperidad profesional y bienestar docente (Correa-Gutiérrez et al., 2026).
2. Caracterizar el impacto de las narrativas sonoras en la autorreflexión, la empatía y la gestión de incidentes críticos de aula (Correa-Gutiérrez, Sáez-Delgado, & Jara-Coatt, 2026; Correa-Gutiérrez, Vera-Sagredo, & Jara-Coatt, 2026).
3. Diseñar una panorámica empírica preliminar a través de antecedentes de investigación sobre el uso de podcasts y tecnologías de audio en el entrenamiento docente.
4. Establecer las implicancias prácticas de la integración de podcasts en programas de formación continua y acompañamiento para redes educativas y Servicios Locales de Educación Pública (SLEP).
5. Proponer una arquitectura tecnológica, un modelo taxonómico (Modelo ECOS) y una lista de verificación que permitan a equipos de desarrollo evaluar si una aplicación de podcast socioemocional incorpora los componentes fundamentales para el fortalecimiento de las CSE docentes, considerando además sus implicancias psicológicas y éticas.

2. DESARROLLO

2.1. EL PODCAST COMO DISPOSITIVO DE AUTORREFLEXIÓN Y SOPORTE EMOCIONAL

A diferencia de los textos académicos densos o los videos que exigen atención visual exclusiva, el podcast opera bajo el principio de **multitarea cognitiva de baja interferencia** y aprendizaje auditivo situado (Haleem et al., 2022). Esta característica es particularmente relevante para un profesorado que reporta sistemáticamente la falta de tiempo como la principal barrera de participación en formación continua (Lozano-Peña et al., 2023). Su incorporación en los trayectos formativos, tanto en la Formación Inicial Docente (FID) como en ejercicio, responde a tres pilares fundamentales, que se desarrollan a continuación.

2.2. OPTIMIZACIÓN DE LA CARGA COGNITIVA Y ACCESIBILIDAD UBICUA

El formato sonoro permite al docente consumir contenidos formativos de alta calidad mientras realiza actividades rutinarias o traslados. Esto reduce drásticamente la fricción de entrada característica de los cursos en línea tradicionales y optimiza los recursos atencionales del profesorado, cumpliendo un rol de amortiguador frente al estrés laboral agudo (Sáez-Delgado et al., 2023).

Esta ventaja cognitiva no debe entenderse como un simple ahorro de tiempo, sino como una modificación cualitativa de la relación del profesorado con la tecnología formativa. La evidencia sobre uso de dispositivos móviles en población escolar advierte que la sobreexposición no regulada a pantallas y contenidos sonoros puede erosionar la capacidad de concentración sostenida (Contreras-Saavedra et al., 2025); trasladado al contexto docente, esto implica que el diseño de un podcast formativo no debe limitarse a “llenar tiempos muertos”, sino a estructurar deliberadamente episodios breves, con objetivos de aprendizaje explícitos y cierres reflexivos, evitando que la ubicuidad del formato se traduzca en un consumo pasivo y fragmentado. En este sentido, desde la perspectiva de la neurofisiología uno de los hallazgos que mejor se han explorado en relación con el aprendizaje multimedia, revela que dividir una lección continua en partes breves y controladas por el usuario, en lugar de presentarse de forma ininterrumpida, reduce la sobrecarga de la memoria de trabajo y mejora la transferencia del aprendizaje, ya que otorga al oyente el tiempo suficiente para procesar cada segmento antes de dar paso al siguiente (Mayer, 2001). Además, Weng et al., 2025, enfatizan un efecto significativo y sostenido en el tiempo para retener mejor la información respecto de quienes seguían recibiendo información nueva o continuaban con otra tarea distinta.

2.3. NARRATIVA SONORA Y ACOMPAÑAMIENTO SOCIOEMOCIONAL

En consonancia con las estrategias de acompañamiento formativo descritas por Correa-Gutiérrez, Vera-Sagredo y Jara-Coatt (2026), el podcast actúa como un canal íntimo de mentoría. A través de viñetas sonoras, análisis de dilemas éticos y testimonios de pares, el formato sonoro estimula la empatía y la toma de perspectiva, facilitando la validación emocional y la deconstrucción de creencias disfuncionales sobre la autoridad y el manejo de aula.

Este rol de mentoría sonora encuentra respaldo en modelos teóricos que sitúan la percepción de competencia socioemocional docente como un mecanismo vital del aprendizaje socioemocional adulto (Collie et al., 2025): cuando el profesorado escucha a pares narrar la resolución de dilemas éticos o de aula, no solo recibe información, sino que experimenta un proceso vicario de modelamiento emocional que refuerza su propia percepción de autoeficacia. Sistematizaciones recientes sobre modelos de competencia socioemocional docente subrayan, en la misma línea, que los procesos de innovación educativa exitosos integran explícitamente instancias de mentoría narrativa entre pares como mecanismo de transferencia de competencias (Jara-Coatt et al., 2025a).

2.4. MITIGACIÓN DEL AISLAMIENTO PROFESIONAL

El podcast seriado no solo transmite contenidos teóricos sobre inteligencia emocional y regulación del estrés (Lozano-Peña et al., 2024), sino que consolida un sentido de pertenencia institucional y comunidad de práctica asincrónica, aliviando la sensación de soledad pedagógica en contextos de alta vulnerabilidad (Jara-Coatt et al., 2025b).

La soledad pedagógica se agrava en escuelas con alta rotación docente, en contextos rurales o de difícil acceso, y en trayectorias marcadas por la sobrecarga emocional derivada de la relación con las familias y apoderados, cuya intensidad ha sido documentada como una fuente específica de desgaste (Ojeda-Rodríguez et al., 2026). Asimismo, la evidencia disponible indica que las experiencias de desgaste profesional y de violencia escolar afectan de manera diferenciada según género, por lo que cualquier estrategia de acompañamiento sonoro debiera incorporar una perspectiva de género explícita en la curatoría de testimonios y en el abordaje de las temáticas tratadas (Baeza-Sepúlveda et al., 2026a, 2026b).

2.5. PANORÁMICA PRELIMINAR: ESTUDIOS SOBRE EL USO DE PODCASTS EN LA FORMACIÓN DOCENTE

Para respaldar la viabilidad de esta tecnología, la Tabla 1 sintetiza experiencias de investigación internacional que han implementado podcasts y recursos de audio para entrenar distintas dimensiones del profesorado.

Tabla 1. Estudios preliminares sobre el uso de podcasts y tecnologías de audio en la formación docente.

Referencia y Contexto	**Variable / Dimensión Estudiada**	**Tipo de Tecnología / Formato**	**Principales Resultados y Efectos Observados**
Reupert & Dalgarno (2011) Australia (FID)	Gestión de aula, reflexión crítica y empatía ante conductas desafiantes.	Podcasts seriados combinados con blogs reflexivos y viñetas multimedia.	Los docentes en formación incrementaron su capacidad de análisis crítico frente a dilemas conductuales y mejoraron su empatía pedagógica.
Lozano-Peña et al. (2024) Chile (en servicio)	Competencias socioemocionales, autorregulación y habilidades sociales (Programa ESED-10).	Módulos de audio autoguiados complementarios a guías impresas de entrenamiento.	Favoreció la asimilación de estrategias de afrontamiento y redujo significativamente los indicadores de estrés laboral docente.
Correa-Gutiérrez, Vera-Sagredo y Jara-Coatt (2026) Chile (FID)	Acompañamiento socioemocional y andamiaje en la práctica temprana.	Dispositivos de audio portátiles integrados en mentorías formativas asincrónicas.	Fortaleció el vínculo de mentoría, optimizó la retroalimentación reflexiva y disminuyó la ansiedad ante las primeras prácticas profesionales.
Haleem et al. (2022) Revisión global	Accesibilidad, flexibilidad cognitiva y retención de saberes pedagógicos.	Plataformas de *podcasting* educativo y microaprendizaje sonoro (*m-learning*).	Demostraron que el audio disminuye la fatiga atencional comparado con el e-learning visual tradicional, mejorando la adherencia formativa.

Referencia y Contexto	Variable / Dimensión Estudiada	Tipo de Tecnología / Formato	Principales Resultados y Efectos Observados
Collie, Sáez-Delgado y Granziera (2025) Marco teórico internacional	Percepción de competencia socioemocional docente como mecanismo del aprendizaje socioemocional adulto.	Marco conceptual integrador que sustenta el uso de narrativas sonoras entre pares.	Sustenta conceptualmente el modelamiento vicario mediante narrativas de pares como vía de aprendizaje socioemocional adulto.
Sáez-Delgado, Coronado-Sánchez et al. (2025) Revisión sistemática internacional	Uso de tecnologías digitales para apoyar la formación socioemocional docente.	Revisión sistemática de plataformas digitales, aplicaciones móviles y recursos de audio/video.	Identificó al podcast y a los recursos de audio como tecnologías emergentes de alta escalabilidad y bajo costo de implementación.

Los patrones que emergen de la Tabla 1 son consistentes: en los seis antecedentes, el uso de audio y podcast como formato formativo se asocia a mejoras en variables socioemocionales, empatía, autorregulación, afrontamiento del estrés, y a una reducción de la fricción de acceso propia de los formatos tradicionales. Esta convergencia es coherente con hallazgos en poblaciones estudiantiles, donde los programas de aprendizaje socioemocional muestran asociaciones consistentes con el rendimiento escolar (Bravo-Dinamarca et al., 2026) y con revisiones sistemáticas que documentan la efectividad de intervenciones socioemocionales incluso en poblaciones con necesidades educativas específicas (Contreras et al., 2023), lo que refuerza la plausibilidad de que principios similares de diseño, estructura narrativa, modelamiento vicario, refuerzo entre pares, operen tanto en audiencias docentes como estudiantiles.

2.6. MODELOS DE COMPETENCIAS SOCIOEMOCIONALES DOCENTES QUE SUSTENTAN EL DISEÑO DE CONTENIDOS

El valor formativo de un podcast socioemocional depende críticamente de que su contenido esté anclado en modelos válidos de CSE y no en nociones genéricas de bienestar. En este capítulo se adopta como referencia el modelo histórico-conceptual de competencia socioemocional docente propuesto por Lozano-Peña et al. (2021), que integra dimensiones de autoconciencia, autorregulación, conciencia social, habilidades relacionales y toma de decisiones responsables, en línea con el marco de aprendizaje

socioemocional de CASEL (CASEL, 2020), y que ha sido posteriormente refinado mediante revisiones sistemáticas sobre competencias socioemocionales en docentes de educación primaria y secundaria (Lozano-Peña et al., 2022) y sobre programas de intervención docente en CSE (Lozano-Peña et al., 2023).

A este marco conceptual se suma la disponibilidad de instrumentos psicométricamente validados para Chile e Iberoamérica, como la EHSED-30 (Lozano-Peña et al., 2026) y el SEMS-IT (Sáez-Delgado et al., 2024), además de sistematizaciones recientes de modelos de competencia socioemocional docente orientados a la innovación educativa (Jara-Coatt et al., 2025a) y a la resiliencia del profesorado de educación primaria (Jara-Coatt et al., 2026a). La integración de estos modelos e instrumentos en el guion de un podcast socioemocional, por ejemplo, dedicando series temáticas a cada dimensión del modelo, o utilizando reactivos adaptados de la EHSED-30 como base de las preguntas de autoevaluación incluidas en cada episodio, es lo que permite pasar de un podcast "inspiracional" genérico a un dispositivo de audio-mediación con trazabilidad teórica y empírica.

2.7. ARQUITECTURA DE UNA APLICACIÓN DE PODCAST PARA EL DESARROLLO SOCIOEMOCIONAL DOCENTE

Diseñar una aplicación móvil que incorpore el podcast como núcleo formativo exige ir más allá de una biblioteca de episodios: requiere especificar una arquitectura que articule contenido pedagógico, mecanismos de interacción, comunidad y gobernanza de datos. La Figura 1 propone una arquitectura de referencia en cinco capas, concebida para orientar a equipos de desarrollo, diseñadores instruccionales y responsables de política educativa que deseen construir, o evaluar, una aplicación de podcast orientada al fortalecimiento de las CSE docentes.

La capa de Experiencia de Usuario (UX) concentra las funcionalidades básicas de reproducción, descarga *offline* y accesibilidad, atendiendo especialmente a las condiciones de conectividad limitada que caracterizan a numerosas escuelas rurales y a los SLEP de zonas apartadas (Correa-Gutiérrez et al., 2026). La capa Pedagógica-Reflexiva concentra el contenido propiamente dicho, los episodios, guiones y series temáticas fundamentados en los modelos descritos en la sección 4.3, junto con mecanismos de autorregulación como pausas reflexivas y diarios de audio. La capa Comunitaria habilita mentoría entre pares y comunidades de práctica asincrónicas, atendiendo la dimensión de mitigación del aislamiento profesional descrita en la sección 4.1.3. La capa de Datos y Personalización incorpora analítica de uso y recomendación adaptativa de episodios

mediante IA, siguiendo los principios de personalización basada en evidencia, y no en neuromitos, señalados por Escobar-Casallas et al. (2026). Finalmente, la capa de Seguridad, Ética y Calidad opera de manera transversal, garantizando el cumplimiento de estándares de calidad de software como ISO 25010 (Sáez-Delgado et al., 2026e) y los resguardos éticos que se detallan en la sección 4.7.

Figura 1. Arquitectura en capas de una aplicación de podcast para el desarrollo socioemocional docente (Modelo ECOS).



Nota: elaboración propia. Las letras E, C, O y S señalan la alineación de cada capa con las dimensiones del Modelo ECOS (Tabla 2).

2.8. MODELO ECOS: TAXONOMÍA DE COMPONENTES FUNDAMENTALES PARA APPS DE PODCAST SOCIOEMOCIONAL

Para traducir la arquitectura anterior en un instrumento operativo de diseño y evaluación, se propone el Modelo ECOS, Estructura pedagógica, Componentes de autorregulación, Orientación comunitaria y Seguridad/ética, una taxonomía de cuatro dimensiones y sus componentes clave, sintetizada en la Tabla 2.

Tabla 2. Modelo ECOS: taxonomía de componentes fundamentales para aplicaciones de podcast socioemocional docente.

Dimensión (Modelo ECOS)	**Componentes Clave**	**Función Socioemocional**	**Fundamento**
E – Estructura Pedagógica y Narrativa del Contenido	Guiones basados en modelos de CSE validados; series temáticas progresivas; *storytelling* con dilemas éticos y testimonios reales.	Modela competencias mediante ejemplos auténticos y progresión pedagógica explícita.	CASEL (2020); Lozano-Peña et al. (2021, 2022)
C – Componentes de Autorregulación e Interacción	Transcripciones y subtítulos; pausas reflexivas guiadas; diario de audio (*journaling*); cuestionarios breves de autoevaluación.	Traduce la escucha pasiva en práctica activa de autorregulación emocional.	Lozano-Peña et al. (2024); Sáez-Delgado et al. (2024)
O – Orientación Comunitaria y Mentoría	Foros y comunidades de práctica; mentoría entre pares; testimonios moderados; círculos de conversación asincrónicos.	Reduce el aislamiento profesional y fortalece la pertenencia institucional.	Correa-Gutiérrez et al. (2026); Jara-Coatt et al. (2025b); Collie et al. (2025)
S – Seguridad, Ética y Adaptabilidad de Datos	Consentimiento informado; anonimización de testimonios; personalización adaptativa auditable; estándares de calidad (ISO 25010); accesibilidad universal.	Protege el bienestar y los datos de las personas usuarias, y garantiza equidad de acceso.	Sáez-Delgado et al. (2026e); Escobar-Casallas et al. (2026); Barajas Motta et al. (2025)

El Modelo ECOS no pretende ser exhaustivo, sino ofrecer una heurística mínima y verificable: una aplicación que descuide alguna de sus cuatro dimensiones, por ejemplo, que ofrezca contenido pedagógicamente sólido (E) pero carezca de mecanismos de autorregulación activa (C), o que incorpore personalización algorítmica sin resguardos éticos (S), corre el riesgo de reducir su impacto socioemocional real o de generar daños no intencionados, tal como se discute en la sección 4.7.

2.9. LISTA DE VERIFICACIÓN (CHECKLIST) PARA EL DESARROLLO DE APPS DE PODCAST SEL

A partir del Modelo ECOS, la Tabla 3 traduce cada dimensión en criterios verificables mediante una lista de cotejo, pensada como herramienta práctica de autoevaluación para equipos que estén diseñando o iterando una aplicación de podcast socioemocional docente.

Tabla 3. Lista de verificación (checklist) para el desarrollo de aplicaciones de podcast socioemocional docente, organizada según el Modelo ECOS.

Ítem de Verificación	Dimensión ECOS	Sí / Parcial / No
¿El contenido de los episodios está fundamentado explícitamente en un modelo validado de CSE docente?	E	
¿Existen series temáticas con progresión pedagógica (nivel introductorio, intermedio y avanzado)?	E	
¿Los episodios incluyen testimonios o dilemas éticos reales, debidamente autorizados por sus protagonistas?	E	
¿Cada episodio ofrece una síntesis o "cierre pedagógico" con acciones concretas de aplicación en aula?	E	
¿La aplicación incluye transcripciones y subtítulos accesibles para cada episodio?	C	
¿Existen pausas reflexivas guiadas dentro o inmediatamente después del episodio?	C	
¿Se ofrece un espacio de diario de audio o journaling para quien escucha?	C	
¿Existen instrumentos breves de autoevaluación (p. ej., ítems adaptados de la EHSED-30 o el SEMS-IT)?	C	
¿La aplicación habilita foros o espacios de comunidad de práctica moderados?	O	
¿Existen mecanismos de mentoría entre pares, formales o informales?	O	
¿Se permite compartir testimonios propios de manera segura, voluntaria y moderada?	O	
¿Existen mecanismos explícitos de consentimiento informado para el uso de testimonios reales?	S	
¿La aplicación permite la anonimización o el retiro de testimonios a solicitud de la persona usuaria?	S	
¿El sistema de recomendación o personalización ha sido auditado para detectar sesgos algorítmicos?	S	
¿La aplicación cumple con estándares reconocidos de calidad de software (p. ej., ISO 25010)?	S	
¿Existen funciones offline y de accesibilidad para contextos de conectividad limitada o discapacidad?	S	

Esta lista de verificación no constituye una certificación formal ni sustituye una evaluación de calidad más rigurosa, por ejemplo, mediante los estándares ISO 25010 (Sáez-Delgado et al., 2026e), pero permite a equipos de desarrollo con recursos limitados, como suele ocurrir en proyectos impulsados por SLEP o universidades, identificar de manera rápida y sistemática las brechas más críticas antes de una fase de pilotaje.

2.10. CONSIDERACIONES PSICOLÓGICAS Y ÉTICAS EN EL DISEÑO Y USO DE PODCASTS SOCIOEMOCIONALES

El formato íntimo y conversacional del podcast tiende a generar vínculos parasociales entre quien escucha y quien narra, lo que constituye simultáneamente una fortaleza pedagógica, facilita la identificación y la empatía, y un riesgo que debe gestionarse con cuidado profesional. Episodios que abordan incidentes críticos de aula, dilemas éticos o testimonios de desgaste emocional pueden activar recuerdos difíciles en quien escucha; por ello, el diseño responsable de contenidos requiere avisos de contenido sensible, cierres que ofrezcan estrategias de regulación emocional inmediata, y una curatoría editorial que evite la retraumatización, en línea con los principios de un modelo explicativo de salud mental docente que enfatiza la interacción entre inteligencia emocional y estrategias de afrontamiento (Sáez-Delgado et al., 2023).

Cuando los episodios incorporan testimonios reales de docentes, una de las fortalezas narrativas señaladas en la sección 4.1.2, se plantean exigencias éticas ineludibles de consentimiento informado explícito, posibilidad de anonimización y derecho a retirar el testimonio en cualquier momento, especialmente cuando se relatan experiencias vinculadas a la carga emocional de la relación con apoderados y familias (Ojeda-Rodríguez et al., 2026) o a situaciones de violencia escolar y desgaste con componentes de género (Baeza-Sepúlveda et al., 2026a). Estos resguardos deben quedar explícitos en la capa de Seguridad, Ética y Calidad del Modelo ECOS, y no tratarse como un anexo legal desconectado del diseño pedagógico.

La incorporación de personalización algorítmica en la capa de Datos (sección 4.4) exige, además, una vigilancia activa sobre el sesgo del sistema de recomendación, que podría, por ejemplo, sobreexponer a ciertos perfiles docentes a un único tipo de dilema o narrativa, y sobre el fundamento pedagógico de la personalización misma, evitando que se apoye en marcos sin respaldo empírico como los neuromitos de estilos de aprendizaje (Escobar-Casallas et al., 2026). A ello se suma la necesidad de promover un consumo saludable del formato: la evidencia sobre el uso de *smartphones* y la concentración en población escolar (Contreras-Saavedra et al., 2025) es un recordatorio de que la ubicuidad del audio, presentada en la sección 4.1.1 como una fortaleza, puede convertirse en una fuente adicional de sobrecarga atencional si la aplicación no incorpora límites de uso saludable, recordatorios de pausa y una lógica de “menos y mejor” antes que de consumo continuo.

Finalmente, el diseño de aplicaciones de podcast socioemocional debe adoptar explícitamente una perspectiva de equidad e inclusión: accesibilidad para docentes

con discapacidad auditiva o visual (subtítulos, compatibilidad con lectores de pantalla), pertinencia cultural y lingüística para contextos interculturales, disponibilidad *offline* para escuelas con conectividad limitada, y sensibilidad a las diferencias de género en la experiencia del desgaste profesional (Baeza-Sepúlveda et al., 2026a, 2026b), así como a los desafíos socioemocionales específicos que enfrenta el profesorado en la gestión de su propia regulación emocional dentro del sistema escolar (Contreras-Mejías et al., 2026). Una aplicación de podcast socioemocional que no incorpore estos criterios de manera explícita, y verificable mediante instrumentos como la lista de cotejo de la sección 4.6, corre el riesgo de replicar, en el espacio digital, las mismas desigualdades que busca mitigar en el espacio escolar.

3. DISCUSIÓN: VIABILIDAD, SOSTENIBILIDAD E IMPLICANCIAS PRÁCTICAS

El principal aporte de la propuesta desarrollada en este capítulo consiste en situar el podcast no como un recurso formativo autosuficiente, sino como el componente central de un ecosistema de aprendizaje socioemocional más amplio. Esta comprensión resulta coherente con la perspectiva de Correa-Gutiérrez, Sáez-Delgado y Jara-Coatt (2026), según la cual el bienestar docente no constituye un estado estático, sino un proceso que requiere andamiajes institucionales continuos. Desde este enfoque, el potencial del podcast no deriva únicamente de la posibilidad de escuchar contenidos en distintos momentos y lugares, sino de su articulación con actividades de autorreflexión, oportunidades de aplicación práctica, acompañamiento entre pares y resguardos éticos e institucionales.

Esta distinción resulta fundamental, pues la sola exposición a contenidos sonoros difícilmente produciría cambios sostenidos en competencias complejas como la autorregulación emocional, la conciencia social o la toma de decisiones responsables (CASEL, 2020; Sáez-Delgado et al., 2025). Para que la audio-mediación contribuya al fortalecimiento de estas competencias, el episodio debe operar como un disparador pedagógico que active procesos posteriores de reflexión, intercambio y aplicación. En este sentido, las bitácoras de autorreflexión, los círculos de conversación entre pares y las actividades de anclaje en situaciones reales del aula pueden transformar la escucha en una experiencia formativa más activa y situada (Correa-Gutiérrez, Vera-Sagredo, & Jara-Coatt, 2026; Näykki et al., 2022). El podcast debe entenderse, por tanto, como un mediador cuyo efecto dependerá de las condiciones pedagógicas y organizacionales en las que sea incorporado.

Desde esta perspectiva, la viabilidad de una aplicación de podcast socioemocional no puede evaluarse exclusivamente en términos de disponibilidad

tecnológica. Aunque el formato requiere menos conectividad que otros entornos digitales y permite la descarga de episodios para su escucha offline, su implementación sostenida demanda recursos que suelen permanecer invisibilizados. Entre ellos se encuentran la producción y actualización de contenidos, la revisión pedagógica de los guiones, la moderación de espacios comunitarios, el soporte tecnológico, la protección de datos y la disponibilidad de profesionales capaces de responder ante contenidos emocionalmente sensibles. Por tanto, resulta más riguroso hablar de una tecnología con potencial de implementación flexible y menor exigencia infraestructural que afirmar anticipadamente su costo-efectividad. Esta última deberá ser examinada mediante evaluaciones que comparen los recursos invertidos, la participación alcanzada y los resultados obtenidos frente a otras modalidades de formación socioemocional.

Una segunda implicancia es que la utilización del podcast no debe trasladar al profesorado la responsabilidad exclusiva por su bienestar. El desgaste profesional se relaciona con las condiciones laborales, las exigencias administrativas, las experiencias de violencia, las relaciones institucionales y la disponibilidad de redes de apoyo, por lo que no puede abordarse únicamente mediante estrategias individuales de autorregulación (Baeza-Sepúlveda et al., 2026a; Concha-Herrera et al., 2025; Jara-Coatt et al., 2025b). Si la escucha de episodios y la realización de actividades reflexivas se agregan a la jornada laboral sin tiempo protegido ni reconocimiento institucional, la propuesta podría transformarse en una nueva demanda. Su incorporación requiere, por el contrario, que los establecimientos y los SLEP asignen tiempos formativos, faciliten la participación voluntaria y vinculen los aprendizajes con medidas organizacionales destinadas a mejorar las condiciones de trabajo y las relaciones profesionales.

En términos operativos, la implementación del Modelo ECOS podría desarrollarse de manera gradual. Una primera etapa debiera considerar un diagnóstico participativo de necesidades, mediante el cual docentes, equipos directivos y profesionales responsables de convivencia o bienestar identifiquen los principales desafíos socioemocionales de cada territorio. Esta fase permitiría evitar la producción de contenidos estandarizados y poco pertinentes. Posteriormente, se podría diseñar un pilotaje acotado con una serie breve de episodios, actividades de autorreflexión y espacios moderados de conversación entre pares. Antes de avanzar hacia una implementación más amplia, el pilotaje tendría que ser evaluado en función de su aceptabilidad, facilidad de uso, participación, pertinencia de los contenidos y eventuales efectos no previstos. Solo después de introducir los ajustes derivados de esta evaluación sería recomendable ampliar progresivamente la intervención a otras escuelas o redes educativas.

En el plano pedagógico, cada episodio debería responder a un objetivo explícito vinculado con alguna dimensión de las CSE docentes y finalizar con una actividad susceptible de ser aplicada en la práctica. Los testimonios, dilemas o incidentes críticos pueden facilitar la identificación y la toma de perspectiva, pero requieren preguntas que ayuden a interpretar la experiencia y conectarla con situaciones concretas del aula. De esta manera, el contenido sonoro podría complementarse con pausas reflexivas, registros personales, ejercicios breves de aplicación y conversaciones entre pares. Los modelos de competencia socioemocional docente pueden orientar la selección y secuenciación de estos contenidos, evitando que la propuesta se reduzca a mensajes generales de motivación o autoayuda (Jara-Coatt et al., 2025a).

La dimensión comunitaria del Modelo ECOS también tiene consecuencias prácticas importantes. Los foros, círculos de conversación y mecanismos de mentoría pueden contribuir a disminuir la experiencia de aislamiento, siempre que cuenten con propósitos definidos y una moderación efectiva. No basta con habilitar espacios digitales de interacción, pues estos pueden presentar baja participación, reproducir relaciones jerárquicas o exponer experiencias personales sin los resguardos necesarios. Las comunidades de práctica deberían contar con acuerdos de confidencialidad, normas de convivencia, responsables de moderación y procedimientos para abordar conflictos o contenidos sensibles. Asimismo, la participación no debiera utilizarse como mecanismo de evaluación laboral ni transformarse en una instancia de vigilancia del estado emocional del profesorado.

La implementación en SLEP y redes educativas exige, además, considerar la diversidad territorial y las desigualdades existentes dentro del sistema escolar. La disponibilidad offline y el bajo consumo de datos son condiciones fundamentales para contextos rurales o con conectividad limitada, pero la accesibilidad comprende también transcripciones, compatibilidad con lectores de pantalla, navegación sencilla y alternativas para personas con discapacidad auditiva. A ello debe sumarse la pertinencia cultural y lingüística de las narrativas, especialmente en territorios interculturales, así como una representación equilibrada de experiencias docentes según género, etapa profesional, tipo de establecimiento y contexto educativo. La evidencia sobre bienestar y desgaste docente muestra diferencias asociadas al género y a las condiciones institucionales, por lo que estos criterios deben considerarse tanto en el diseño de contenidos como en la evaluación de la participación y los resultados (Baeza-Sepúlveda et al., 2026a, 2026b; Concha-Herrera et al., 2025).

Una personalización responsable tampoco debería reducir esta diversidad mediante recomendaciones algorítmicas que expongan reiteradamente a las personas

usuarias a contenidos similares o que reproduzcan sesgos presentes en los datos. La asistencia y personalización mediadas por inteligencia artificial pueden favorecer la organización y pertinencia de los contenidos, pero requieren supervisión y evaluación permanente (Rodríguez et al., 2026). También deben evitar fundamentarse en clasificaciones simplificadas o marcos sin respaldo empírico, como los estilos de aprendizaje, y responder a criterios explícitos de inclusión y equidad (Barajas Motta et al., 2025; Escobar-Casallas et al., 2026).

Las implicancias éticas adquieren especial relevancia cuando la aplicación recopila información emocional, respuestas de autoevaluación o testimonios personales. La recolección de datos debe limitarse a aquello que resulte estrictamente necesario para el funcionamiento y evaluación de la propuesta. Las personas usuarias necesitan conocer qué información se registra, con qué finalidad se utiliza, quién puede acceder a ella y cómo solicitar su eliminación. Los testimonios deben contar con consentimiento explícito, opciones de anonimización y posibilidad de retiro. Del mismo modo, los resultados individuales de cuestionarios o registros emocionales no deberían estar disponibles para empleadores, directivos o terceros sin una autorización específica. La capa de seguridad del Modelo ECOS tendría, por consiguiente, que operar transversalmente y no como una fase posterior del desarrollo tecnológico. La adopción de estándares de calidad como ISO 25010 puede contribuir a organizar la evaluación técnica de la aplicación, aunque su cumplimiento no reemplaza el análisis pedagógico ni los resguardos éticos específicos requeridos por este tipo de intervención (Sáez-Delgado et al., 2026e).

También es necesario establecer una frontera clara entre formación socioemocional y atención en salud mental. Una aplicación de podcast puede proporcionar recursos de reflexión y autocuidado, pero no reemplaza la evaluación, el diagnóstico ni el tratamiento profesional. Los episodios que aborden violencia, desgaste intenso o experiencias potencialmente traumáticas deberían incorporar advertencias previas, alternativas para interrumpir la escucha y orientaciones para acceder a redes institucionales o profesionales de apoyo. Esta delimitación protege a las personas usuarias y evita que una herramienta educativa sea presentada como respuesta suficiente frente a problemas que requieren intervención clínica u organizacional.

La evaluación constituye otra condición central para la sostenibilidad. En una primera etapa deberían considerarse indicadores de proceso, como alcance, continuidad de uso, finalización de episodios, participación en actividades y valoración de la experiencia. Posteriormente, podrían examinarse cambios en dimensiones específicas de CSE mediante instrumentos validados, como la EHSED-30 o el SEMS-IT (Lozano-Peña et

al., 2026; Sáez-Delgado et al., 2024). Estos resultados tendrían que complementarse con entrevistas o grupos focales que permitan comprender cómo el profesorado utiliza los contenidos, qué componentes considera pertinentes y qué barreras enfrenta. También sería necesario analizar los indicadores de manera desagregada, dado que los promedios generales pueden ocultar diferencias según género, dependencia, territorio o etapa de la trayectoria profesional.

Los indicadores de resultado deberían responder al modelo de CSE que sustenta la intervención y no limitarse al número de reproducciones o al tiempo de permanencia en la aplicación. Aunque la literatura ha documentado relaciones entre aprendizaje socioemocional y resultados escolares en poblaciones estudiantiles (Bravo-Dinamarca et al., 2026), estos hallazgos no pueden trasladarse directamente a una intervención destinada al profesorado. Si se incorporan indicadores relacionados con clima de aula, relaciones pedagógicas o resultados del estudiantado, deberán considerarse consecuencias indirectas y exploratorias, cuya evaluación requiere diseños específicos.

Para determinar el aporte particular del podcast serán necesarios diseños experimentales o cuasiexperimentales que permitan diferenciar sus posibles efectos de aquellos producidos por los demás componentes del ecosistema. Resultaría pertinente comparar, por ejemplo, la escucha aislada de episodios con intervenciones que incorporen reflexión guiada, acompañamiento entre pares o retroalimentación. Esta distinción permitiría identificar si el principal mecanismo de cambio reside en la narrativa sonora, en la interacción posterior o en la combinación de ambos elementos. Asimismo, las evaluaciones futuras deberían incorporar mediciones de seguimiento que permitan determinar si los aprendizajes se mantienen y se transfieren a situaciones reales del ejercicio docente.

La sostenibilidad requerirá finalmente una estructura de gobernanza que defina responsabilidades institucionales. Los SLEP o universidades responsables de la iniciativa deberían contar con un equipo editorial y pedagógico encargado de revisar contenidos, actualizar episodios y supervisar su coherencia con los modelos de CSE. También se necesita establecer quién administrará la infraestructura tecnológica, moderará las comunidades y responderá ante incidentes de privacidad o seguridad. La incorporación de inteligencia artificial o de entornos inmersivos puede ampliar las posibilidades de personalización e interacción, pero también incrementar la complejidad y los costos de implementación (Rodríguez et al., 2026; Sáez-Delgado et al., 2026e). Antes de añadir estas tecnologías, resulta preferible comprobar la pertinencia pedagógica y la usabilidad de una versión básica, auditable y centrada en las necesidades del profesorado.

En síntesis, la arquitectura y el Modelo ECOS ofrecen una orientación preliminar para diseñar aplicaciones de podcast socioemocional que superen la lógica de una biblioteca de contenidos. Su principal utilidad práctica reside en hacer visibles las condiciones pedagógicas, comunitarias, éticas y organizacionales necesarias para una implementación responsable. Las recomendaciones derivadas de la evidencia sobre formación socioemocional docente, resultados escolares, equidad de género y calidad tecnológica permiten orientar el diseño y el pilotaje de la propuesta (Baeza-Sepúlveda et al., 2026b; Bravo-Dinamarca et al., 2026; Jara-Coatt et al., 2025a). No obstante, tanto el modelo como la lista de verificación deben considerarse propuestas conceptuales susceptibles de validación y ajuste, no estándares definitivos ni instrumentos ya validados. El desafío para futuras investigaciones será determinar en qué condiciones, para qué grupos docentes y mediante qué combinación de componentes la audio-mediación puede contribuir efectivamente al desarrollo socioemocional y al bienestar profesional.

4. CONCLUSIÓN

Este capítulo sistematizó el fundamento teórico y empírico del podcast educativo como dispositivo de audio-mediación para el fortalecimiento de las competencias socioemocionales docentes, y avanzó un aporte original: una arquitectura tecnológica en cinco capas, una taxonomía, el Modelo ECOS, y una lista de verificación asociada, que permiten trasladar la evidencia disponible en CSE docente (Lozano-Peña et al., 2021, 2022, 2023, 2026) a criterios de diseño concretos y verificables para aplicaciones de podcast socioemocional.

Iniciativas editoriales y formativas recientes, como *Aulas que Florecen* (Sáez-Delgado et al., 2026a) o los programas de aprendizaje y servicio orientados al desarrollo socioemocional en educación superior (Sáez-Delgado et al., 2026c), muestran que existe ya un ecosistema de conocimiento acumulado sobre bienestar y CSE docente en el que una tecnología de bajo costo, alta escalabilidad y flexibilidad temporal como el podcast puede insertarse de manera natural. El desafío que queda planteado para investigadores, desarrolladores y responsables de política educativa es traducir ese conocimiento acumulado en dispositivos concretos, evaluables, éticos y centrados en el bienestar real del profesorado, y no solamente en contenidos sonoros aislados.

REFERENCIAS

Arias, J., Salas, J., Chiappe, A., & Sáez-Delgado, F. (2025). The extended education 4.0: Lifelong learning in times of artificial intelligence. *Applied Sciences*, *15*(17), Artículo 9352. https://doi.org/10.3390/app15179352

Baeza-Sepúlveda, C., Sáez-Delgado, F., Jara, P., Morales, L., & Lozano-Peña, G. (2026a). Bienestar docente y violencia escolar en Chile: Desafíos socioemocionales desde una perspectiva de género. En *Psicologia, comportamento humano e saúde mental* (pp. 249–273). Editora Atena. https://doi.org/10.22533/at.ed.1721126130115

Baeza-Sepúlveda, C., Sáez-Delgado, F., Jara-Coatt, P., Zañartu-Canihuante, N., & Brieba-Fuenzalida, J. (2026b). Formación docente, competencias socioemocionales y género: Implicancias para el bienestar y desgaste profesional. En *Psicologia, comportamento humano e saúde mental 2* (pp. 1–16). Editora Atena. https://doi.org/10.22533/at.ed.547122611051

Barajas Motta, N., Chiappe, A., & Sáez-Delgado, F. (2025). Bridging the gap: AI and teacher training for inclusive Education 4.0. *Journal of Research in Special Educational Needs*. Publicación anticipada en línea. https://doi.org/10.1111/1471-3802.70033

Bravo-Dinamarca, J., Llao-Sanhueza, V., Muñoz-Contreras, K., Neira-Mora, Y., Sáez-Delgado, F., Jara-Coatt, P., Correa, P., & Ramos, L. (2026). Habilidades socioemocionales y su impacto en el rendimiento escolar: Una revisión de la literatura. En *Ciências Humanas e os processos de mudança social* (pp. 95–123). Editora Atena. https://doi.org/10.22533/at.ed.301112612016

CASEL. (2020). *Fundamentals of SEL*. Collaborative for Academic, Social, and Emotional Learning. https://casel.org/fundamentals-of-sel/

Collie, R., Sáez-Delgado, F., & Granziera, H. (2025). Teachers' perceived social-emotional competence as a vital mechanism of adult SEL. *Social and Emotional Learning: Research, Practice, and Policy*. Publicación anticipada en línea. https://doi.org/10.1016/j.sel.2025.100117

Concha-Herrera, V., Sáez-Delgado, F., Reynoso-González, O. U., & Mella-Norambuena, J. (2025). Bienestar psicológico y resiliencia en el profesorado de educación básica: Correlación con la edad y diferencias según sexo y dependencia educacional en Chile. *CienciaUAT*, *20*(1), 1–13. https://doi.org/10.29059/cienciauat.v20i1.1986

Contreras, C., Sáez-Delgado, F., Sepúlveda, F., & Ramos-Huenteo, V. (2023). Intervenciones de competencias socioemocionales en adolescentes con diagnóstico del espectro autista: Una revisión sistemática. *Páginas de Educación*, *16*(1), 47–80. https://doi.org/10.22235/pe.v16i1.3056

Contreras-Mejías, E., Cornejo-Urrea, A., Sáez-Delgado, F., Jara-Coatt, P., & Correa-Gutiérrez, P. (2026). Desafíos socioemocionales en el sistema escolar: Un análisis de la inteligencia y la regulación emocional en la labor docente. En *Educação, formação humana e políticas educacionais 5* (pp. 1–23). Editora Atena. https://doi.org/10.22533/at.ed.925152623041

Contreras-Saavedra, C., Sáez-Delgado, F., López-Angulo, Y., & Mella-Norambuena, J. (2025). El uso de smartphone y la concentración en clases en adolescentes chilenos: Diagnóstico de un nuevo desafío para la escuela. En *Desafíos y potencialidades de la inteligencia artificial: Nuevos paradigmas para la calidad educativa* (Cap. 9, pp. 165–182). Editorial Dykinson.

Correa-Gutiérrez, P., Sáez-Delgado, F., & Jara-Coatt, P. (2026). *Hacia un ejercicio profesional próspero: El rol del aprendizaje socioemocional y el bienestar docente*. Editorial Artemis. https://doi.org/10.37572/EdArt_230326864

Correa-Gutiérrez, P., Vera-Sagredo, A., & Jara-Coatt, P. (2026). Estrategias para el acompañamiento socioemocional en la Formación Inicial Docente. *Revista Espacios*, *47*(1), 154–166. https://doi.org/10.48082/espacios-a26v47n01i13

Escobar-Casallas, L., Chiappe, A., & Sáez-Delgado, F. (2026). From learning-style neuromyths to AI-enabled personalisation for teacher preparation. *Improving Schools*, 1–26. Publicación anticipada en línea. https://doi.org/10.1177/13654802261432037

Haleem, A., Javaid, M., Qadri, M. A., & Suman, R. (2022). Understanding the role of digital technologies in education: A review. *Sustainable Operations and Computers*, *3*, 275–285. https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.05.004

Jara-Coatt, P., Constenla-Nuñez, J., & Sáez-Delgado, F. (2025a). Modelos de competencia socioemocional docente para la innovación educativa. *Revista Espacios*, *46*(3), Artículo 21. https://doi.org/10.48082/espacios-a25v46n03p21

Jara-Coatt, P., Sáez-Delgado, F., Constenla-Núñez, J., & Mella-Norambuena, J. (2026a). Competencias socioemocionales y resiliencia del profesorado de educación primaria. *Revista Española de Pedagogía*, *84*(293), 151–170. https://doi.org/10.9781/rep.2026.848

Jara-Coatt, P., Sáez-Delgado, F., Mella-Norambuena, J., Zañartu, N., & Hinojosa, V. (2025b). Well-being of public school teachers in Chile: The role of resilience and positive relationships. *Revista de Investigación en Educación*, *23*(2), 373–391. https://doi.org/10.35869/reined.v23i2.6343

Jara-Coatt, P., Villa, D., Sáez-Delgado, F., Correa-Gutiérrez, P., & Rodríguez, R. (2026b). Rol docente como mediador en la resolución de conflictos en el aula de educación primaria. En *Sociedade, diversidade e políticas de inclusão social* (pp. 116–140). Editora Atena. https://doi.org/10.22533/at.ed.642112610028

Lozano-Peña, G., Sáez-Delgado, F., Bernardo, A., & López-Angulo, Y. (2024). *Programa de entrenamiento en autorregulación emocional y habilidades sociales para docentes ESED-10. Una guía para promover la autorregulación emocional y habilidades sociales docentes*. RIL editores.

Lozano-Peña, G., Sáez-Delgado, F., López-Angulo, Y., Contreras-Saavedra, C., Ramos-Huenteo, V., & Mella-Norambuena, J. (2023). Programas de intervención docente en competencias socioemocionales: Una revisión sistemática de la literatura. *Aula de Encuentro*, *25*(2), 215–241. https://doi.org/10.17561/ae.v25n2.7391

Lozano-Peña, G. M., Sáez-Delgado, F., & López-Angulo, Y. (2022). Competencias socioemocionales en docentes de primaria y secundaria: Una revisión sistemática. *Páginas de Educación*, *15*(1), 1–22. https://doi.org/10.22235/pe.v15i1.2598

Lozano-Peña, G., Sáez-Delgado, F., López-Angulo, Y., & Mella-Norambuena, J. (2021). Teachers' social–emotional competence: History, concept, models, instruments, and recommendations for educational quality. *Sustainability*, *13*(21), Artículo 12142. https://doi.org/10.3390/su132112142

Lozano-Peña, G., Sáez-Delgado, F., Mella-Norambuena, J., & López-Angulo, Y. (2026). Validación de la escala de habilidades socioemocionales docentes (EHSED-30) en Chile. *Perspectiva Educacional*, *65*(2), 277–301. https://doi.org/10.4151/07189729-Vol.65-Iss.2-Art.1748

Mayer, R. E., & Chandler, P. (2001). When learning is just a click away: Does simple user interaction foster deeper understanding of multimedia messages? *Journal of Educational Psychology*, *93*(2), 390–397. https://doi.org/10.1037/0022-0663.93.2.390

Näykki, P., Laitinen-Väänänen, S., & Burns, E. (2022). Student teachers' video-assisted collaborative reflections of socio-emotional experiences during teaching practicum. *Frontiers in Education*, *7*, Artículo 846567. https://doi.org/10.3389/feduc.2022.846567

Ojeda-Rodríguez, B., Vergara-Manquilepe, E., Zapata-Bueno, Q., Sáez-Delgado, F., Jara-Coatt, P., Páez-Bustamante, Y., & Cid-Aguayo, M. (2026). La carga emocional de la docencia: Revisión teórica de la relación entre profesorado y apoderados. En *Ciências Humanas e os processos de mudança social* (pp. 124–154). Editora Atena. https://doi.org/10.22533/at.ed.301112612017

Quevedo Piratova, D. A., Sánchez Duarte, M., Chiappe, A., & Sáez-Delgado, F. (2025). Intelligent classrooms: How AI and IoT can reshape learning spaces. *European Journal of Education*, *60*(1), Artículo e70000. https://doi.org/10.1111/ejed.70000

Reupert, A., & Dalgarno, B. (2011). Using online blogs to develop student teachers' behaviour management approaches. *Australian Journal of Teacher Education*, *36*(5), 48–64. https://doi.org/10.14221/ajte.2011.v36n5.4

Rodríguez, G., Chiappe, A., & Sáez-Delgado, F. (2026). Lifelong learning in an AI-driven world: Assistance, personalization and automation under scrutiny. *Frontiers in Education*, *11*, Artículo 1916528. https://doi.org/10.3389/feduc.2026.1916528

Sáez-Delgado, F., Coronado-Sánchez, P., Mella-Norambuena, J., López-Angulo, Y., Brieba-Fuenzalida, J., Contreras-Saavedra, C., & Lozano-Peña, G. (2025). Use of digital technologies to support socioemotional teacher training: A systematic review. *Education Sciences*, *15*(10), Artículo 1377. https://doi.org/10.3390/educsci15101377

Sáez-Delgado, F., Jara-Coatt, P., Correa-Gutiérrez, P., Lozano-Peña, G., & Morales-Maure, L. (2026a). *Aulas que florecen*. Editorial Hambatu Sapiens. https://doi.org/10.63862/ehs-978-9907-805-27-7

Sáez-Delgado, F., Morales-Maure, L., García-Marimón, O., & Gutiérrez-González, J. (2026b). Impacto de un programa formativo basado en reflexión autocrítica y mundos virtuales sobre competencias didácticas y socioemocionales en docentes de matemática. *Formación Universitaria*, *19*(2), 127–140. http://dx.doi.org/10.4067/s0718-50062026000200127

Sáez-Delgado, F., Jara-Coatt, P., Correa-Gutiérrez, P., & Morales-Maure, L. (2026c). Impacto del aprendizaje + servicio en el desarrollo socioemocional en educación superior. En *Aprendizaje y servicio en la formación universitaria: Experiencias, investigación e innovación pedagógica en Chile* (pp. 94–107). Editorial Artemis. https://doi.org/10.37572/EdArt_1704269568

Sáez-Delgado, F., Jara-Coatt, P., Contreras-Manríquez, F., Brieba-Fuenzalida, J., & Rodríguez-Gómez, R. (2026d). Programas de aprendizaje socioemocional para estudiantes: Una revisión sistemática. En *Educação, formação humana e políticas educacionais 6* (pp. 75–96). Editora Atena. https://doi.org/10.22533/at.ed.356162619055

Sáez-Delgado, F., López-Angulo, Y., Mella-Norambuena, J., Hartley, K., & Sepúlveda, F. (2023). Mental health in school teachers: An explanatory model with emotional intelligence and coping strategies. *Electronic Journal of Research in Education Psychology*, *21*(61), 559–586. https://doi.org/10.25115/ejrep.v21i61.8322

Sáez-Delgado, F., Mella-Norambuena, J., & López-Angulo, Y. (2024). Psychometric properties of the SocioEmotional Skills Instrument for Teachers (SEMS-IT) using network approach: English and Spanish version. *Frontiers in Psychology*, *15*, Artículo 1421164. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1421164

Sáez-Delgado, F., Mella-Norambuena, J., Coronado, P., López-Angulo, Y., Ramírez, G., Badilla-Quintana, M., & Chiappe, A. (2026e). Virtual world platforms: A comparative analysis of quality according to ISO 25010 standards and maturity models. *Virtual Worlds*, *5*(1), 1–30. https://doi.org/10.3390/virtualworlds5010002

Weng, L., Yu, J., Lv, Z., Yang, S., Jülich, S. T., & Lei, X. (2025). Effects of wakeful rest on memory consolidation: A systematic review and meta-analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, *32*(5), 1937–1968. https://doi.org/10.3758/s13423-025-02665-x

CAPÍTULO 14

INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN LA GESTIÓN PÚBLICA: INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y CALIDAD DEL SERVICIO AL CIUDADANO

Data de submissão: 26/08/2026
Data de aceite: 10/09/2026

Dr. José Ángel Meneses Jiménez
Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica, Perú
https://orcid.org/0000-0002-0973-6837

Dr. Manuel Rocha Gonzales
Universidad Nacional de Ucayali, Perú
https://orcid.org/0000-0002-8667-1600

Mg. Raul Hernando Aguado Apolaya
Universidad Nacional de Cañete, Perú
https://orcid.org/0000-0002-7587-7363

RESUMEN: El presente capítulo examina la relación entre la inteligencia artificial (IA) y la calidad del servicio percibida por el usuario en la Municipalidad Provincial de Chincha, Perú, durante el año 2025. En un contexto de transformación digital estatal, regulado por la Ley N.º 31814 y la Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial 2021-2026, el estudio responde a la urgente necesidad de evaluar cómo las tecnologías emergentes pueden revertir los indicadores de insatisfacción ciudadana, donde solo el 30 % de los usuarios se siente satisfecho con la atención pública. Desde un enfoque cuantitativo, correlacional y diseño no experimental transversal, se aplicó un cuestionario basado en la escala Likert a 97 trabajadores administrativos, cuya fiabilidad fue confirmada mediante un Alfa de Cronbach de 0,940. Los datos se procesaron con el software SPSS versión 25 y se analizaron mediante la correlación de Spearman. Los resultados revelaron una asociación positiva y fuerte entre la IA y la calidad del servicio (rho = 0,746; p < 0,001). Al desagregar por dimensiones del modelo SERVQUAL, se encontraron correlaciones significativas en fiabilidad (rho = 0,375), capacidad de respuesta (rho = 0,417), seguridad (rho = 0,540), empatía (rho = 0,377) y elementos tangibles (rho = 0,550). Se concluye que la IA constituye una variable estratégicamente asociada a la mejora de la calidad del servicio público local, particularmente en dimensiones operativas, aunque su implementación debe ser complementaria y no sustitutiva de la atención humana.

PALABRAS CLAVE: inteligencia artificial; calidad del servicio; modelo SERVQUAL; gestión pública local; transformación digital.

TECHNOLOGICAL INNOVATION IN PUBLIC MANAGEMENT: ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND QUALITY OF CITIZEN SERVICE

ABSTRACT: This chapter examines the relationship between artificial intelligence (AI) and the quality of service perceived by users at the Provincial Municipality of Chincha, Peru, during 2025. In a context of state digital

transformation, regulated by Law No. 31814 and the National Artificial Intelligence Strategy 2021-2026, the study addresses the urgent need to evaluate how emerging technologies can reverse citizen dissatisfaction indicators, where only 30 % of users are satisfied with public attention. From a quantitative, correlational, and non-experimental cross-sectional approach, a Likert-scale questionnaire was applied to 97 administrative workers, whose reliability was confirmed by a Cronbach's Alpha of 0.940. Data were processed with SPSS version 25 and analyzed using Spearman's correlation. The results revealed a positive and strong association between AI and service quality (rho = 0.746; p < 0.001). When disaggregated by the SERVQUAL model dimensions, significant correlations were found in reliability (rho = 0.375), responsiveness (rho = 0.417), assurance (rho = 0.540), empathy (rho = 0.377), and tangibles (rho = 0.550). It is concluded that AI constitutes a variable strategically associated with improving local public service quality, particularly in operational dimensions, although its implementation must be complementary and not substitutive of human care.
KEYWORDS: artificial intelligence; service quality; SERVQUAL model; local public management; digital transformation.

1. INTRODUCCIÓN

La irrupción de la inteligencia artificial (IA) ha marcado un hito en la evolución tecnológica, redefiniendo paradigmas en diversos sectores, incluyendo la administración pública. En el contexto global, donde la eficiencia, la transparencia y la calidad del servicio son demandas crecientes por parte de la ciudadanía, la IA emerge como una herramienta prometedora para transformar la interacción entre el Estado y sus usuarios (Maita et al., 2022; Ocaña-Fernández et al., 2021). En el Perú, la promulgación de la Ley N.º 31814 (2023), que promueve el uso de la IA para el desarrollo económico y social del país, junto con la Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial (ENIA) 2021-2026, refleja el interés y la necesidad de integrar estas tecnologías en las entidades públicas para optimizar procesos y mejorar el bienestar social.

No obstante, la implementación de la IA en el sector público no está exenta de desafíos. A nivel mundial, entidades como la UNESCO (2022) señalan la resistencia de los ciudadanos, la brecha digital, la falta de capacitación del personal y los problemas relacionados con la calidad y privacidad de los datos como barreras significativas. En el ámbito nacional, a pesar de iniciativas como el chat virtual Suyay del Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social (MIDIS) o los aplicativos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), el uso oficial de IA en los gobiernos locales es aún incipiente. El diagnóstico de la Presidencia del Consejo de Ministros (PCM) evidencias serias problemáticas en la atención al usuario, con solo un 30 % de satisfacción ciudadana, lo que subraya la urgencia de evaluar cómo la IA podría contribuir a revertir esta situación y mejorar la calidad del servicio (Presidencia del Consejo de Ministros, 2022).

La provincia de Chincha, ubicada en la región Ica, concentra estas disfunciones con especial agudeza. Sus 11 gobiernos locales, incluida la Municipalidad Provincial, operan al margen de las experiencias pioneras desarrolladas a nivel ministerial. La ausencia de implementaciones oficiales de IA obedece, en gran medida, a la invisibilización práctica del Decreto Supremo N.º 115-2025-PCM, cuya difusión entre las municipalidades ha sido insuficiente. El resultado es una paradoja preocupante: la normativa existe, la tecnología está disponible, pero la atención al usuario permanece centrada en lógicas predigitales que la Política Nacional de Modernización de la Gestión Pública al 2030 identifica críticamente como una "limitada capacidad de gestión interna para generar bienes y servicios de calidad" (Presidencia del Consejo de Ministros, 2022, p. 12).

Ante este panorama, surge la interrogante que orienta el presente estudio: ¿cómo se relaciona la inteligencia artificial con la calidad del servicio percibida por el usuario en la Municipalidad Provincial de Chincha? La relevancia de esta pregunta radica en que admite una verificación empírica rigurosa, examinando con precisión cuánto pueden contribuir soluciones específicas como chatbots para consultas de primer nivel, sistemas de gestión predictiva de demandas y automatización de respuestas estandarizadas a reducir los tiempos de espera, estandarizar la información proporcionada y liberar la capacidad humana para atender casos que efectivamente requieren intervención personalizada.

El capítulo se estructura de la siguiente manera: tras esta introducción, se presentan los fundamentos teóricos y normativos que sustentan el estudio; posteriormente, se describe la metodología empleada; en seguida, se exponen los resultados y su discusión; y finalmente, se derivan las conclusiones y recomendaciones para la gestión pública local.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y NORMATIVOS

2.1. LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL COMO TECNOLOGÍA EMERGENTE EN EL ESTADO

La inteligencia artificial puede definirse, de acuerdo con la Ley N.º 31814 (2023), como una tecnología emergente de propósito general que tiene el potencial de mejorar el bienestar de las personas, contribuir a una actividad económica sostenible, aumentar la innovación y la productividad, y ayudar a responder a desafíos globales clave. Esta definición legal no concibe a la IA como un ente estático, sino como una herramienta tecnológica fundamental dentro del proceso nacional de transformación digital.

Desde una perspectiva teórica, la adopción de la IA en la gestión pública puede comprenderse a la luz de la teoría de la complejidad, propuesta por autores como

Edgar Morin y Niklas Luhmann. Esta teoría concibe los sistemas como una red no lineal en donde se presentan interacciones emergentes, autoorganización y factores de adaptabilidad (González, 2009). La IA enriquece estos sistemas complejos adaptativos al procesar información de forma independiente, atendiendo de forma masiva a los usuarios mediante chatbots predictivos y reduciendo las brechas de expectativas-percepción a través de adaptaciones no lineales proporcionadas por los algoritmos que la constituyen.

Los antecedentes internacionales evidencian un creciente interés por el tema. Maita et al. (2022) describen cómo el uso de la IA ha generado un cambio disruptivo en la gestión pública peruana durante la pandemia de COVID-19, proporcionando herramientas para mejorar la eficiencia e impacto administrativo. Por su parte, Ocaña-Fernández et al. (2021) analizan cómo la IA trasciende en el campo de la administración pública, destacando oportunidades y desafíos críticos para su implementación. Wang et al. (2021), en un estudio empírico con 492 usuarios de asistentes de voz con IA en China, evidencian que el uso efectivo de estos sistemas se asocia estrechamente con el valor privado y la justicia procesal, aunque no necesariamente con la confianza en el gobierno. Madan y Ashok (2023) señalan que la adopción de la IA en la administración pública enfrenta dilemas éticos relacionados con la equidad, la transparencia y la privacidad, proponiendo una agenda de investigación que abarque todo el ciclo de la innovación.

En el contexto peruano, estudios como el de Maurtua (2024) encuentran una correlación positiva moderada (rho = 0,628) entre la IA y la modernización de la gestión administrativa en el Gobierno Regional de Piura. Luna (2023) ofrece un compendio cualitativo sobre la implementación de la IA en el Estado peruano, identificando situaciones favorables y desafíos en el contexto internacional y nacional. Estos antecedentes revelan que, si bien la literatura sobre IA en gestión pública es creciente, persisten vacíos empíricos en el nivel de gobierno local, especialmente en regiones fuera de Lima.

2.2. LA CALIDAD DEL SERVICIO Y EL MODELO SERVQUAL

El modelo SERVQUAL, desarrollado por Parasuraman, Zeithaml y Berry en 1985, constituye una herramienta fundamental para evaluar la calidad del servicio. Este modelo se basa en la premisa de que la calidad del servicio se determina por la discrepancia entre las expectativas de los clientes y sus percepciones reales del servicio recibido (Duque, 2005). El modelo identifica cinco dimensiones clave:

1. Fiabilidad: capacidad de proporcionar el servicio prometido de manera consistente y precisa.

2. Capacidad de respuesta: disposición del personal para ayudar a los clientes y ofrecer un servicio ágil.
3. Seguridad: nivel de confianza que los clientes sienten hacia el personal y la organización, incluyendo competencia, cortesía y credibilidad.
4. Empatía: atención personalizada e individualizada que se brinda a los clientes.
5. Elementos tangibles: apariencia física de las instalaciones, equipos, personal y materiales de comunicación.

La calidad del servicio en el sector público presenta características particulares debido a la intangibilidad, heterogeneidad e inseparabilidad de los servicios (Lovelock, 1983, citado en Duque, 2005). En este sentido, la evaluación subjetiva del usuario adquiere una relevancia crucial, ya que los ciudadanos comparan constantemente lo que desean con lo que obtienen al interactuar con el servicio público (Barroso, 2000, citado en Miranda, 2017).

2.3. MARCO NORMATIVO DE LA TRANSFORMACIÓN DIGITAL EN EL PERÚ

El andamiaje normativo peruano ofrece un contexto favorable para la adopción de la IA en la gestión pública. La Ley N.º 27658, Ley Marco de Modernización de la Gestión del Estado, establece la obligación del Estado de transformarse para mejorar la eficiencia y el servicio al ciudadano. El Decreto Supremo N.º 103-2022-PCM aprueba la Política Nacional de Modernización de la Gestión Pública al 2030, que define el modelo de "Estado moderno" basado en bienes, servicios y regulaciones de calidad que generen valor público.

En términos específicos de gobernanza digital, el Decreto de Urgencia N.º 006-2020 crea el Sistema Nacional de Transformación Digital, brindando el marco necesario para liderar el uso ético de tecnologías emergentes. Asimismo, el Decreto Legislativo N.º 1412 (Ley de Gobierno Digital) y su reglamento, el Decreto Supremo N.º 029-2021-PCM, establecen la estructura de las políticas públicas relacionadas con la gobernanza para la transformación digital del Estado.

De particular relevancia para el presente estudio son las Normas Técnicas de la Secretaría de Gestión Pública. La Norma Técnica N.º 001-2022-PCM/SGP promueve un enfoque de aseguramiento de la calidad que integra planificación, ejecución, verificación y mejora. Por su parte, la Norma Técnica N.º 002-2025-PCM/SGP reorganiza el funcionamiento de los gobiernos locales bajo un enfoque de creación de valor público y gestión por procesos. En este marco, la IA se vincula como un habilitador tecnológico para fortalecer el rediseño y la automatización de procesos críticos, siempre que su

adopción responda a una lógica de gestión basada en procesos y a reglas explícitas de gobernanza institucional.

3. METODOLOGÍA

3.1. ENFOQUE, TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio se enmarca en un enfoque cuantitativo, debido a que se analizó una realidad objetiva respecto a las variables de inteligencia artificial y calidad del servicio, demostrando mediante la contrastación de hipótesis y la presentación de resultados con técnicas estadísticas (Hernández et al., 2014). Según su finalidad, la investigación es de tipo básica, pues se profundizó en los conocimientos de ambas variables en su contexto natural (Sánchez et al., 2018).

El nivel de investigación es correlacional, dado que su propósito fue analizar la relación entre la inteligencia artificial y la calidad del servicio, identificando el nivel de asociación entre los elementos estudiados sin establecer una relación causal directa (Hernández et al., 2014). El diseño es no experimental, transversal-correlacional, ya que la información se recopiló en un único momento, permitiendo obtener una fotografía del fenómeno estudiado (Carrasco, 2005).

3.2. POBLACIÓN, MUESTRA E INSTRUMENTOS

La población estuvo constituida por el personal administrativo que trabaja en la atención al público en los gobiernos locales de la provincia de Chincha, conformada por aproximadamente 130 trabajadores administrativos. La muestra, determinada mediante la fórmula de poblaciones finitas con un error proyectado del 5 %, un nivel de confianza del 95 % (Z = 1,96) y una proporción esperada del 50 %, arrojó un tamaño de 97 trabajadores, seleccionados mediante muestreo no probabilístico por conveniencia.

La técnica de recolección de datos fue la encuesta, utilizando como instrumento un cuestionario estructurado con escala Likert. El instrumento se organizó en dos grandes secciones: la primera destinada a medir la inteligencia artificial según sus dimensiones de tecnología emergente, innovación y productividad, y marco normativo; y la segunda destinada a medir la calidad del servicio según las cinco dimensiones del modelo SERVQUAL. La validez de contenido fue evaluada mediante juicio de tres expertos, quienes verificaron la pertinencia, claridad y coherencia de los ítems. La confiabilidad del instrumento fue validada mediante el coeficiente Alfa de Cronbach, obteniendo un valor de 0,940, lo que indica una excelente fiabilidad de consistencia interna.

3.3. PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

La recolección de información se realizó durante los meses de mayo y junio de 2025 en la provincia de Chincha. Se aplicó una prueba piloto a 25 trabajadores para verificar la claridad de los ítems, y posteriormente se administró el cuestionario final a los 97 participantes de la muestra mediante un formulario digital. Los datos fueron procesados y analizados utilizando el software SPSS versión 25.

Para el análisis descriptivo se utilizaron frecuencias y porcentajes. Para la contrastación de hipótesis se aplicó la correlación de Spearman, dado que las variables no cumplen con todos los supuestos de normalidad exigidos para la correlación de Pearson. El nivel de significancia adoptado fue del 5 % ($p < 0,05$) y del 1 % ($p < 0,01$) para las correlaciones generales.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PERFIL DE LOS PARTICIPANTES Y PERCEPCIÓN DESCRIPTIVA

El perfil de los 97 encuestados reveló que el 45,36 % se concentró en el rango etario de 25 a 35 años, el 54,6 % fue de sexo masculino y el 44,3 % contaba con grado académico de profesional universitario. Este perfil sugiere una muestra compuesta mayoritariamente por adultos jóvenes con educación superior, factores que pueden influir en una mayor apertura hacia la adopción tecnológica.

En términos descriptivos, la percepción general de la inteligencia artificial mostró que un 42,26 % de los trabajadores manifestó una actitud favorable (“De acuerdo” y “Totalmente de acuerdo”). Sin embargo, un 29,90 % se ubicó en una postura neutral, y un 27,84 % expresó desacuerdo, lo que refleja preocupaciones, resistencia al cambio o falta de información. Al desagregar por dimensiones, la tecnología emergente obtuvo un 68,04 % de percepción favorable; la innovación y productividad, un 61,86 %; mientras que el marco normativo mostró una notable falta de consenso, con un 40,21 % de respuestas neutrales y un 35,05 % en desacuerdo con la existencia de normativas claras para la implementación ética de la IA.

Respecto a la calidad del servicio, un 67,01 % de los encuestados valoró positivamente la calidad general. Las dimensiones mejor evaluadas fueron seguridad (80,41 % de percepción favorable) y fiabilidad (73,19 %). Por el contrario, los elementos tangibles registraron la percepción más baja (58,76 % favorable), sugiriendo oportunidades de mejora en infraestructura y equipamiento.

4.2. RELACIÓN ENTRE INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y CALIDAD DEL SERVICIO

La hipótesis general planteaba que la inteligencia artificial se relaciona positivamente con la calidad del servicio al usuario. Los resultados inferenciales confirmaron esta suposición. La Tabla 1 presenta la correlación entre ambas variables.

Tabla 1. Correlación entre inteligencia artificial y calidad del servicio.

Calidad del servicio	
Inteligencia artificial	Coeficiente de correlación .746**
	Sig. (Bilateral) .000
	N 97

La correlación es estadísticamente significativa al nivel de 0,01 (bilateral).

La Tabla 1 revela una correlación positiva y fuerte entre la inteligencia artificial y la calidad del servicio (rho = 0,746; p < 0,001). Este hallazgo permite aceptar la hipótesis alterna y afirmar que existe una relación significativa y directa entre ambas variables. Desde la teoría de la complejidad, esta asociación puede interpretarse como un patrón sistémico: en organizaciones públicas con múltiples interdependencias, la adopción de la IA suele ir acompañada de cambios simultáneos en prácticas de gestión, coordinación y manejo de información, generando nuevos patrones de comportamiento que culminan en una mejora global del sistema (González, 2009).

Este resultado es consistente con el estudio de Maurtua (2024), quien encontró una correlación moderada (rho = 0,628) entre la IA y la modernización administrativa en Piura. La correlación más fuerte hallada en Chincha (0,746) puede interpretarse como que, cuando la variable de resultado es la calidad del servicio al usuario —más cercana a la experiencia ciudadana, la asociación con la IA se percibe con mayor intensidad. Asimismo, el hallazgo se alinea con el diagnóstico de la Política Nacional de Modernización de la Gestión Pública al 2030, que identifica el "insuficiente aprovechamiento del uso estratégico de las TIC" como una limitante crítica de la capacidad de gestión pública (Presidencia del Consejo de Ministros, 2022).

4.3. ANÁLISIS POR DIMENSIONES DEL MODELO SERVQUAL

Para comprender con mayor precisión los mecanismos de acción de la IA en la calidad del servicio, se analizó su relación con cada una de las cinco dimensiones del modelo SERVQUAL. La Tabla 2 sintetiza los coeficientes de correlación de Spearman obtenidos.

Tabla 2. Correlaciones de Spearman entre inteligencia artificial y dimensiones de la calidad del servicio.

Dimensión	Coeficiente rho	Significación (bilateral)	Interpretación
Fiabilidad	0,375**	0,000	Baja y significativa
Capacidad de respuesta	0,417**	0,000	Moderada y significativa
Seguridad	0,540**	0,000	Moderada y significativa
Empatía	0,377**	0,000	Baja y significativa
Elementos tangibles	0,550**	0,000	Moderada y significativa

La correlación es estadísticamente significativa al nivel de 0,01 (bilateral).

Respecto a la fiabilidad, se encontró una correlación positiva y baja (rho = 0,375; p < 0,001). Esta dimensión, entendida como la capacidad de prestar el servicio prometido de forma precisa y consistente, se ve influenciada por la IA, aunque en menor medida que otras dimensiones. Esto puede deberse a que la implementación de la IA en la municipalidad se encuentra en una fase inicial, centrada más en la interfaz con el usuario que en el mejoramiento de los procesos internos que dan soporte a la gestión administrativa. Como señala Aquino (2023), la IA puede promover la eficiencia en procesos críticos que demandan rigurosidad, pero este potencial aún no se ha materializado plenamente en el contexto local.

En cuanto a la capacidad de respuesta, la correlación fue positiva y moderada (rho = 0,417; p < 0,001). Este hallazgo es coherente con la naturaleza operativa de las herramientas de IA, particularmente en la automatización de consultas frecuentes, la derivación inteligente de trámites y la reducción de tiempos de espera. El resultado está alineado con Ramírez-Hernández et al. (2023), quienes proponen el uso de chatbots y estructuras conversacionales en gobiernos locales para superar las limitaciones de interfaces estáticas. La percepción de los trabajadores confirma que la IA se valora como un apoyo para liberar tiempo del personal, permitiendo concentrar el esfuerzo humano en situaciones complejas.

La relación entre la IA y la seguridad fue positiva y moderada, correspondiendo a la correlación más alta reportada para esta dimensión (rho = 0,540; p < 0,001). En el contexto de SERVQUAL, la seguridad se vincula con generar confianza, competencia, cortesía y credibilidad. Los trabajadores perciben que la IA tiene el potencial de fortalecer la confianza al brindar información precisa, asegurar la trazabilidad de los procesos y reducir la discrecionalidad. Este hallazgo resulta interesante porque contrasta con el escepticismo ciudadano sobre la ética de los algoritmos señalado por la UNESCO (2022), sugiriendo que, en la práctica cotidiana, los beneficios asociados al control y la transparencia son más visibles que los riesgos desde la perspectiva del personal administrativo.

Respecto a la empatía, se obtuvo una correlación positiva y baja (rho = 0,377; p < 0,001). Este resultado era previsible y refleja una de las tensiones centrales en la implementación de la IA: si bien puede facilitar una atención más personalizada al reducir fricciones (esperas, confusión, falta de información), no puede replicar la conexión emocional genuina. Como advierte Ocaña-Fernández et al. (2021), uno de los desafíos de la IA es precisamente sostener las dimensiones humanas del servicio. Por tanto, su función más realista es complementar la atención, apoyando al servidor para que este pueda ejercer mejor su trabajo sin sacrificar la calidad humana del trato.

Finalmente, en los elementos tangibles se evidenció una correlación positiva y moderada (rho = 0,550; p < 0,001). Aunque la IA es intangible, su adopción suele venir acompañada de modernización visible (equipos, conectividad, sistemas, plataformas y canales digitales), lo que influye en la percepción de "tangibles" como parte de la calidad del servicio. Este resultado es congruente con la Norma Técnica N.º 001-2022-PCM/SGP, que promueve la innovación para optimizar la eficiencia y cerrar brechas de servicio.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Respecto al objetivo general, se concluye que la inteligencia artificial se relaciona de manera positiva y significativa con la calidad del servicio al usuario de la Municipalidad Provincial de Chincha. La fuerte correlación encontrada (rho = 0,746; p < 0,001) confirma que la IA es un factor determinante en la mejora de la calidad del servicio percibida, subrayando su potencial transformador en la gestión pública local.

En términos de los objetivos específicos, se concluye lo siguiente:

1. La IA se relaciona positivamente con la fiabilidad (rho = 0,375; p < 0,001), aunque de forma baja, lo que indica que su impacto en la consistencia y precisión del servicio aún no es tan pronunciado como en otras dimensiones, probablemente por encontrarse en una fase inicial de implementación.
2. La IA se relaciona positivamente con la capacidad de respuesta (rho = 0,417; p < 0,001), evidenciando una asociación consistente con la naturaleza operativa de las herramientas de IA, particularmente en la automatización de consultas y la reducción de tiempos de espera.
3. La IA tiene una relación positiva y moderada con la seguridad (rho = 0,540; p < 0,001), resaltando su papel en el fortalecimiento de la confianza del usuario a través de la trazabilidad de procesos y la reducción de la discrecionalidad.

4. La IA se relaciona positivamente con la empatía (rho = 0,377; p < 0,001), aunque la correlación es baja, reflejando la tensión inherente entre la automatización tecnológica y la dimensión humana del servicio público.
5. La IA se relaciona positivamente con los elementos tangibles (rho = 0,550; p < 0,001), dado que su adopción se asocia con la modernización visible de la infraestructura tecnológica y los canales digitales de atención.

En síntesis, la investigación aporta evidencia científica empírica original sobre la asociación entre la inteligencia artificial y la calidad del servicio en un gobierno local peruano. Los resultados demuestran que, incluso en escenarios de adopción incipiente, la IA se configura como una variable estratégicamente asociada a la mejora de la calidad del servicio público, particularmente en dimensiones operativas (capacidad de respuesta, seguridad, elementos tangibles) más que en dimensiones que dependen de procesos internos consolidados (fiabilidad) o de atributos inherentemente humanos (empatía).

5.2. RECOMENDACIONES DE POLÍTICA PÚBLICA Y GESTIÓN MUNICIPAL

Con base en los hallazgos obtenidos, se presentan las siguientes recomendaciones concebidas como alternativas viables de solución para la brecha entre la disponibilidad normativa de la IA y su implementación efectiva en la Municipalidad Provincial de Chincha:

Diseñar e implementar un plan de adopción gradual de inteligencia artificial focalizado en la atención a los usuarios.

Considerando que la correlación más fuerte se observó con la capacidad de respuesta y los elementos tangibles, se recomienda priorizar la implementación de chatbots para consultas de primer nivel, sistemas de clasificación automática de solicitudes y plataformas de seguimiento de trámites. Se sugiere una fase piloto de seis meses en las áreas de mayor demanda ciudadana (licencias, tributos y registro civil), con indicadores de seguimiento en tiempos de respuesta y satisfacción de los usuarios.

Fortalecer las capacidades digitales del personal administrativo mediante un programa sistemático de formación en inteligencia artificial.

Dado que cerca del 30 % de los encuestados manifestó una postura neutral y otro 28 % expresó desacuerdo hacia la IA, se recomienda implementar un programa de capacitación continua que desarrolle competencias en comprensión algorítmica, gestión ética de datos y diseño de procesos automatizados. Se sugiere establecer convenios con instituciones de educación superior de la región para la certificación de competencias.

Desarrollar un marco de gobernanza de datos que sustente la implementación ética y segura de la inteligencia artificial.

Atendiendo a la falta de consenso sobre el marco normativo (40,21 % de respuestas neutrales), se recomienda establecer protocolos internos de gobernanza de datos alineados al Decreto Supremo N.º 115-2025-PCM y a la Norma Técnica N.º 001-2022-PCM/SGP. Se propone la conformación de un área de datos municipal que supervise la trazabilidad de los procesos administrativos automatizados.

Rediseñar los procesos administrativos críticos integrando la inteligencia artificial para mejorar la fiabilidad del servicio.

Dado que la fiabilidad presentó la correlación más baja (rho = 0,375), se recomienda realizar un mapeo y rediseño de los procesos en áreas de licencias, obras y administración tributaria, identificando puntos críticos donde los algoritmos de validación automática de requisitos y alertas de cumplimiento de plazos puedan reducir errores y variabilidad en la atención.

Establecer un sistema de medición continua de la satisfacción del usuario que alimente la mejora de los servicios basados en inteligencia artificial.

Finalmente, se recomienda implementar mecanismos sistemáticos de retroalimentación ciudadana, como encuestas automatizadas post-atención y paneles de ciudadanos, que permitan monitorear la evolución de la calidad del servicio y ajustar las herramientas de IA según las expectativas cambiantes de los usuarios, evitando la deshumanización del trato que advierte la literatura especializada.

REFERENCIAS

Aquino Antón, D. R. (2023). La inteligencia artificial como herramienta para fortalecer la eficiencia y transparencia en las contrataciones del Estado en Perú [Tesis de maestría, Universidad César Vallejo].

Carrasco Díaz, S. (2005). Metodología de la investigación científica: Pautas metodológicas para diseñar y elaborar el proyecto de investigación. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Congreso de la República del Perú. (2023, 4 de julio). Ley que promueve el uso de la inteligencia artificial en favor del desarrollo económico y social del país (Ley N.º 31814). Diario Oficial El Peruano. https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/ley-que-promueve-el-uso-de-la-inteligencia-artifi-ley-n-31814-2192926-1/

Duque Oliva, E. J. (2005). Revisión del concepto de calidad del servicio y sus modelos de medición. *INNOVAR. Revista de Ciencias Administrativas y Sociales, 15(25), 64-80. https://www.redalyc.org/pdf/818/81802505.pdf

González, J. (2009). La teoría de la complejidad. Dyna, 76(157), 243-245.

Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación (6ta ed.). McGraw-Hill.

Luna García, M. J. S. (2023). El Estado peruano en la implementación de la inteligencia artificial en la modernización del Estado, 2023 [Tesis de maestría, Universidad César Vallejo].

Madan, R., y Ashok, M. (2023). AI adoption and diffusion in public administration: A systematic literature review and future research agenda. Government Information Quarterly, 40(1), 101774. https://doi.org/10.1016/j.giq.2022.101774

Maita Cruz, Y. M., Flores Sotelo, W. S., Maita Cruz, Y. A., y Cotrina Aliaga, J. C. (2022). Inteligencia artificial en la gestión pública en tiempos de Covid-19. Revista de Ciencias Sociales, 28(especial), 1-15. https://doi.org/10.31876/rcs.v28i.38167

Maurtua Quevedo, E. R. (2024). La Inteligencia Artificial y modernización de la gestión administrativa en la Región Piura, 2024 [Tesis de maestría, Universidad César Vallejo].

Miranda, M. (2017). Calidad del servicio y satisfacción del paciente que acude a la clínica odontológica de la Universidad Católica de Santa María [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio Institucional UCSM. https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/cd9dd2ff-7aef-46d0-858c-2aff766a6831

Ocaña-Fernández, Y., Valenzuela-Fernández, L. A., Vera-Flores, M. A., y Rengifo-Lozano, R. A. (2021). Inteligencia artificial (IA) aplicada a la gestión pública. Revista Venezolana de Gerencia, 26(94), 696-707. https://doi.org/10.52080/rvgv26n94.14

Presidencia del Consejo de Ministros. (2022, 11 de noviembre). Norma Técnica N.º 001-2022-PCM/SGP: Norma Técnica para la Gestión de la Calidad de Servicios del Sector Público (Resolución de Secretaría de Gestión Pública N.º 011-2022-PCM/SGP). https://www.gob.pe/institucion/pcm/normas-legales/1705101-029-2021-pcm

Presidencia del Consejo de Ministros. (2022). Política Nacional de Modernización de la Gestión Pública al 2030 (Decreto Supremo N.º 103-2022-PCM). https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5331019/3787-version-digital-del-documento-pnmgp-2030.pdf

Presidencia del Consejo de Ministros. (2025, 4 de febrero). Norma Técnica N.º 002-2025-PCM/SGP: Gestión por Procesos en las entidades de la Administración Pública (Resolución de Secretaría de Gestión Pública N.º 002-2025-PCM/SGP). https://www.gob.pe/institucion/pcm/normas-legales/6501954-002-2025-pcm-sgp

Ramírez-Hernández, P., Valle Cruz, D., y Mendoza Méndez, R. V. (2023). Revisión de los chatbots basados en inteligencia artificial en la administración pública: Hacia una arquitectura para el gobierno. Espacios Públicos, 24(60), 1-20. https://doi.org/10.36677/espaciospublicos.v23i60.21317

Sánchez, H., Reyes, C., y Mejía, K. (2018). *Manual de términos en investigación científica, tecnológica y humanística* (1ra ed.). Universidad Ricardo Palma.

UNESCO. (2022). Recomendación sobre la ética de la inteligencia artificial. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

Wang, C., Teo, T. S. H., y Janssen, M. (2021). Public and private value creation using artificial intelligence: An empirical study of AI voice robot users in Chinese public sector. International Journal of Information Management, 61, 102401. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2021.102401

CAPÍTULO 15

DIFICULTADES EN LA RESOLUCIÓN DE EJERCICIOS Y HABILIDADES MATEMÁTICAS DE ESTUDIANTES EN LA MATERIA DE LENGUAJES Y AUTÓMATAS I

Data de submissão: 25/08/2026
Data de aceite: 10/09/2026

María Eugenia Carreón Romero
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán
División de Ing. en Sistemas Computacionales
Teziutlán-Puebla México
https://orcid.org/0000-0002-5878-654X

Emmanuel Vázquez Benito
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán
División de Ing. en Sistemas Computacionales
Teziutlán-Puebla México
https://orcid.org/0000-0003-4544-6199

Roberto Carlos Carreón Romero
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla
División de Ing. en Industrial
Teziutlán-Puebla México
https://orcid.org/0009-0009-3564-7916

RESUMEN: Las habilidades matemáticas juegan un papel fundamental en la formación en ingeniería. La asignatura de Lenguajes y Autómatas I integra conocimientos indispensables para plantear y dar solución a problemas formales. En este trabajo se desarrolló una investigación con enfoque cuantitativo, de alcance descriptivo y diseño transversal, evaluando a una muestra de 40 estudiantes de Ingeniería en Sistemas Computacionales del ITST. Para la recolección de datos se emplearon cuestionarios teóricos-prácticos, series de ejercicios y bitácoras de seguimiento. Los resultados revelan que el 65% de los estudiantes presenta dificultades en la resolución correcta de ejercicios, destacando nudos críticos en las habilidades de análisis y aplicación de procedimientos. Finalmente, las conclusiones señalan la necesidad urgente de fortalecer el pensamiento lógico-matemático y de implementar estrategias didácticas secuenciales que mitiguen el rezago académico en la asignatura.
PALABRAS CLAVE: matemáticas; Autómatas; dificultades; resolución ejercicios.

DIFFICULTIES IN EXERCISE RESOLUTION AND MATHEMATICAL SKILLS OF STUDENTS IN THE COURSE OF FORMAL LANGUAGES AND AUTOMATA I

ABSTRACT: Mathematical skills play a fundamental role in engineering education. In particular, the course **"Formal Languages and Automata I"** integrates knowledge essential for formulating and solving formal problems. This study employed a quantitative approach with a descriptive scope and a cross-sectional

design, evaluating a sample of 40 Computer Systems Engineering students from ITST. Data collection involved theoretical-practical questionnaires, exercise sets, and **tracking logs**. The results reveal that 65% of the students **exhibit difficulties in solving** exercises correctly, highlighting critical gaps in analysis skills and the application of procedures. Finally, the conclusions point to an urgent need to strengthen logical-mathematical thinking and implement sequential teaching strategies to mitigate academic underperformance in the course.
KEYWORDS: mathematics; Automata; difficulties; exercise resolution.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la mayoría de los sectores productivos exigen ingenieros con habilidades especiales para su ejercicio profesional, como pensamiento lógico, resolución de problemas y capacidad de abstracción. De esta manera, las instituciones de educación superior que imparten programas de ingeniería tienen como tarea estructurar y poner en marcha currículos que orienten al desarrollo y potencialización de capacidades en lógica y abstracción, con la meta de lograr profesionales creativos en ingeniería, con las habilidades, destrezas, conocimientos y operaciones para resolver los problemas de diferentes sectores de la sociedad (Torres Encalada & Pogo Muñoz, 2024).

Es indiscutible que los procesos matemáticos constituyen la base conceptual y metodológica sobre la cual se construye la ingeniería, al ser un lenguaje universal indispensable para la conceptualización, el diseño tecnológico y la resolución de problemas complejos en el ámbito profesional (Toro Carvajal, Hernán Ortiz, & Jiménez García , 2020). Bajo esta perspectiva, el diseño curricular actual en las ingenierías distribuye de forma estratégica los tópicos matemáticos en diferentes cursos iniciales que sirven como eje articulador en asignaturas de tronco común y especialidad, lo que provee al estudiante de los conocimientos previos necesarios para afrontar con éxito la resolución de problemas complejos en las materias de semestres avanzados (Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM], 2025).

En este sentido, las carreras de ingeniería relacionadas con la Computación contienen asignaturas con temas que requieren alta abstracción matemática. Entre varias de las carreras impartidas en el TecNM con este perfil se encuentra la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales; la cual cuenta con un tronco común integrado de materias del área de matemáticas. Sin embargo, las asignaturas propias del perfil requieren, además del contenido matemático, aplicar procesos de abstracción específicos; tal es el caso de la materia de Lenguajes y Autómatas I, la cual exige una base sólida en pensamiento lógico-matemático (Navas López, 2024). El análisis de los instrumentos de evaluación en materias con procesos matemáticos sugiere que, aunque

el TecNM busca fomentar competencias específicas enfocadas a la resolución de problemas, existe la necesidad de buscar estrategias que ayuden a fortalecer dicha área (Escobar & García, s.f.).

Las dificultades en la comprensión de conceptos teóricos y su aplicación técnica suelen derivar de carencias previas en la formación matemática básica (Lozada López, 2024). La falta de dominio en la resolución de problemas – donde los estudiantes muestran dificultades incluso para traducir enunciados verbales a representaciones simbólicas o gráficas – se convierte en un obstáculo directo para el éxito en materias que requieren la aplicación razonada de procesos matemáticos (Valbuena, 2025). Esta situación da pauta para buscar propuestas adaptables a las nuevas generaciones, que incorporen metodologías de enseñanza que fortalezcan el aprendizaje y particularmente el razonamiento lógico (Vázquez Lezcano, 2025).

Uno de los fines de la enseñanza de las matemáticas es la resolución de problemas (Orrantia, 2018), siendo esta el medio esencial para lograr los aprendizajes de manera activa, además de dar oportunidades de plantear, explorar y resolver problemas con un esfuerzo significativo, es decir, aplicar la teoría en temas de interés para el estudiante (Defaz Cruz, 2017). La funcionalidad del conocimiento matemático se genera a partir del uso de un conjunto de procedimientos denominados algoritmos, que orientan las acciones para la resolución de problemas; de esta forma el conocimiento procedimental permite desarrollar el saber hacer. Así, la resolución de problemas constituye uno de los propósitos centrales de la enseñanza de las matemáticas, pues permite que los estudiantes utilicen los conceptos en situaciones que exigen comprender, explorar, argumentar y verificar.

En el ámbito de la ingeniería, este proceso adquiere una dimensión adicional: la solución debe ser funcional, justificable, reproducible y susceptible de comprobación. Resolver problemas plantea tres aspectos fundamentales: planteamiento y resolución, razonamiento matemático (formulación, argumentación, demostración) y Comunicación matemática (Gallego , Bustamante, Salcedo , Gava, & Alfaro, 2017). Por lo que resulta necesario aproximarse a las nuevas tendencias que plantean la resolución de problemas como el motor del aprendizaje del conocimiento matemático creando un ambiente de trabajo reflexivo, dialogante y crítico (Mallart & Deulofeu, 2017).

El conocimiento de las matemáticas “es también conocimiento tecnológico y se refiere a la capacidad para aplicar determinados conceptos y procedimientos a la resolución práctica de problemas” (Barajas Arenas, Parada Rico, & Molina Zavaleta, 2017). Lo anterior evidencia que los estudiantes de la carrera de Sistemas Computacionales

requieren una sólida formación matemática para desarrollar destrezas cognitivas, capacidad de razonamiento y pensamiento lógico. En este contexto, la resolución de problemas constituye un elemento fundamental en la enseñanza y el aprendizaje de la materia de Lenguajes y Autómatas I.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La asignatura Lenguajes y Autómatas I, que se cursa en el sexto semestre de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales, integra conocimientos desarrollados en asignaturas previas, entre ellas se encuentran: Probabilidad, Arquitectura de Computadoras, Matemáticas Discretas, Programación Orientada a Objetos y Estructura de Datos. Asimismo, sus contenidos se relacionan con la formación para el desarrollo de software y sistemas computacionales. Por ello, el aprendizaje de esta asignatura requiere que los estudiantes cuenten con una base sólida de conocimientos matemáticos, particularmente en aquellos temas que sirven de fundamento para el estudio de los lenguajes formales y los autómatas.

Durante el desarrollo de la asignatura, la evaluación considera diversas evidencias de aprendizaje. Entre ellas, la entrega de ejercicios ocupa un lugar relevante, ya que permite valorar si el estudiante comprende los conceptos, aplica los algoritmos y utiliza adecuadamente las técnicas y los procedimientos requeridos. Para que estas actividades sean consideradas satisfactorias, deben entregarse en la fecha establecida e incluir una solución completa, ordenada y correcta. La resolución de estos ejercicios implica seguir una serie de pasos en los que intervienen procesos de análisis, organización y toma de decisiones. El estudiante debe recuperar conocimientos previos, seleccionar los procedimientos pertinentes, aplicar técnicas y verificar la coherencia de los resultados obtenidos. Sin embargo, se han identificado dificultades relacionadas con el dominio de conocimientos matemáticos básicos, como la jerarquía de operaciones, la representación de fórmulas en un lenguaje de programación y el seguimiento ordenado de los procedimientos.

Estas dificultades pueden conducir a planteamientos incorrectos y en consecuencia, a soluciones incompletas o erróneas. En este sentido, el desempeño insuficiente en la resolución de los ejercicios puede relacionarse, entre otros factores, con un dominio limitado de contenidos y habilidades matemáticas, particularmente en el análisis de problemas, la selección y aplicación de métodos, así como el procesamiento y la representación de datos.

3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN Y OBJETIVO

En el trabajo propone como pregunta de investigación: ¿Cuáles son las habilidades matemáticas que intervienen en la resolución de ejercicios de Lenguajes y Autómatas I, y qué dificultades específicas presentan los estudiantes de Ingeniería en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán durante el periodo 2025? El objetivo general es Identificar las habilidades matemáticas que intervienen en la resolución de ejercicios de la asignatura Lenguajes y Autómatas I, y describir las dificultades que presentan los estudiantes de Ingeniería en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán durante el periodo 2025.

4. METODOLOGÍA

El método de investigación utilizado en este trabajo es de enfoque cuantitativo, de tipo transversal con alcance descriptivo. En el estudio se consideró a los estudiantes inscritos en el 6º. semestre de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales (ISC) del Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán (ITST). Los instrumentos de recolección de datos usados en el estudio fueron cuestionarios teórico-prácticos, banco de ejercicios por tema, prácticas y bitácoras de registro, así como, uso de la plataforma Moodle.

1. Lugar donde se desarrolló el estudio. Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán, en la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales (ISC).

2. Población y muestra. Estudiantes de los grupos A y B, de los sextos semestres de la Carrera de Sistemas Computacionales inscritos en el año 2025. La muestra se obtuvo a partir de la fórmula estadística para cálculo de poblacionales finitas:

$$n = \frac{N \times Z_a^2 \times p \times q}{d^2 \times (N-1) + Z_a^2 \times p \times q}$$

Donde: *N* = Población total=50 estudiantes, Z_a =Nivel de Confianza del 95% equivalente a 1.96, *p* = proporción esperada del 50% = 0.5, *q* = 1 – p = 0.5 y d= margen de error 7% = 0.07. Al sustituir los valores en la fórmula y calcular se tiene que **n= 40**, que corresponde al valor de la muestra. Con relación a la selección de los 40 estudiantes de los grupos A y B, se consideró seleccionar los 20 estudiantes de cada grupo que asistieron de manera regular a clases.

3. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos. Se utilizaron cuestionarios en línea, diseño de series de ejercicios; como herramienta de apoyo para aplicar cuestionarios teóricos se empleó la plataforma Moodle. Con relación al diseño

del instrumento para identificar el uso correcto de fórmulas, técnicas y métodos en la solución de ejercicios, se elaboraron cuestionarios en línea con reactivos de opción múltiple, falso y verdadero, complementación y cálculo de resultados. Respecto al instrumento para conocer el desempeño de los estudiantes en la resolución de ejercicios, se proporcionó previamente a los alumnos una serie de problemas a resolver, diseñados de acuerdo con las competencias específicas de la asignatura. Para el registro de datos se utilizó una bitácora que contiene los resultados de la revisión de la serie de ejercicios entregada por cada estudiante y correspondiente a los diferentes temas de la asignatura. La información registrada incluye datos sobre la cantidad de ejercicios realizados, la cantidad de ejercicios completos y la cantidad de ejercicios correctos. Con respecto a las habilidades matemáticas requeridas para que los estudiantes cursen la asignatura y desarrollen correctamente los ejercicios solicitados, fue necesario analizar la relación de cada uno de los temas de la asignatura de Lenguajes y Autómatas I con el uso de procesos matemáticos.

4. Procedimiento metodológico, incluyó 9 pasos, los cuales se mencionan a continuación: 1. Análisis del proceso matemático de los temas de la asignatura., 2. Elaboración de instrumentos (series de ejercicios, listas de cotejo y bitácoras). 3. Entrega y recolección de ejercicios por tema. 4. Revisión de los ejercicios de la temática analizada. 5. Descarga y llenado de bitácoras con los datos obtenidos en la revisión de los ejercicios. 6. Procesamiento de los datos mediante el uso de estadísticos descriptivos (media, mediana, moda, varianza, desviación estándar). 7. Identificación de las habilidades matemáticas necesarias en los estudiantes mediante la agrupación y clasificación de los datos. 8. Análisis de resultados. 9. Conclusión y respuesta a la pregunta de investigación.

5. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación, se muestra el análisis de las habilidades matemáticas requeridas para la resolución de ejercicios de los seis temas que integran la asignatura de Lenguajes y Autómatas I, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Temas y uso de habilidades matemáticas requeridas para el desarrollo de ejercicios.

		HABILIDADES MATEMÁTICAS					
NUM	TEMA	1 ANALIZAR	2 REPRESENTAR INFORMACIÓN	3 APLICAR PROCEDIMENTOS/ TÉCNICAS	4 DISEÑAR SOLUCIONES/ ALGORITMOS	5 REALIZAR APLICACIONES	FACTOR
1	Introducción a los lenguajes formales	1	1	1	0	0	3

		HABILIDADES MATEMÁTICAS					
NUM	TEMA	1 ANALIZAR	2 REPRESENTAR INFORMACIÓN	3 APLICAR PROCEDIMENTOS/ TÉCNICAS	4 DISEÑAR SOLUCIONES/ ALGORITMOS	5 REALIZAR APLICACIONES	FACTOR
2	Expresiones Regulares	1	1	1	1	1	5
3	Autómatas Finitos	1	1	1	1	1	5
4	Análisis Léxico	1	1	1	1	1	5
5	Análisis Sintáctico	1	1	1	1	1	5
6	Máquinas de Turing	1	1	1	1	0	4

La Tabla 1 muestra el tipo y cantidad de habilidades matemáticas requeridas por los estudiantes para desarrollar los ejercicios propuestos por cada uno de los temas de la asignatura.

Tabla 2. Análisis de habilidades matemáticas para el desarrollo de ejercicios por tema de la asignatura de Lenguajes y Autómatas I.

Tema	Subtema	Habilidad Matemática					Max
		1	2	3	4	5	
1.Lenguajes. Formales	1. Alfabeto	x	x				2
	2. Cadenas	x	x	x			3
	3. Lenguajes	x	x	x			3
	4. Estructura						0
	5. Fases Compilador						0
							3
2 Expresiones Regulares	1. Definición	x	x	x			3
	2. Diseño	x	x	x	x		4
	3. Aplicaciones	x	x	x	x	x	5
							5
3. Autómatas Finitos	1. Conceptos	x	x	x			3
	2. AFND y AFD	x	x	x			3
	3. ER uso AF	x	x	x	x		4
	4. Minimización	x	x	x			3
	5. ER usar	x	x	x	x		4
	6. Aplicaciones	x	x	x	x	x	5
							5

Tema	Subtema	Habilidad Matemática					Max
		1	2	3	4	5	
4.A.Léxico	1. Funciones	x	x				2
	2. Componentes,	x	x	x	x		4
	3. Tablas tokens	x	x	x	x	x	5
	4. Errores	x	x	x			3
	5. Generadores AL	x	x	x	x		4
	6. Aplicaciones	x	x	x	x	x	5
							5
5.A.Sintáctico	1. Clasificación	x	x	x			3
	2. GLC	x	x	x			3
	3. Árboles	x	x	x	x		4
	4. Diagramas	x	x	x			3
	5. Matriz Predict.	x	x	x	x		4
	6. Errores	x	x	x	x		4
	7. Generació	x	x	x	x	x	5
							5
6.M.Turing	8. Def. Const	x		x	x		3
	9. Lenguajes	x		x	x	x	4
							4

La Tabla 2 muestra los subtemas correspondientes a cada uno de los temas de la asignatura de lenguajes y Autómatas I, así como, las habilidades para analizar, representar información, aplicar procedimientos, calcular, diseñar soluciones y algoritmos y realizar

aplicaciones de software; elementos requeridos por los estudiantes para lograr un buen desempeño en la entrega de ejercicios. Lo anterior permite obtener el factor de impacto de las habilidades matemáticas requeridas en cada uno de los temas de la asignatura.

6. RESULTADOS

El siguiente apartado presenta los resultados del instrumento aplicado a la muestra de 40 estudiantes que cursaron la materia de Lenguajes y Autómatas I, de la carrera de ISC del ITST en el año 2025. A continuación, se muestra el concentrado de datos recolectados mediante el uso de la bitácora, donde se identifica cada elemento muestral de la población estudiada mediante un número ID, representado con un número entero entre 1 y 40.

Tabla 3. Resultados obtenidos en la revisión de ejercicios del tema 1 de los 40 estudiantes.

Estudiante	Ejercicios Resueltos	Ejercicios Completos	Ejercicios Correctos	Promedio	Estudian-te	Ejercicios Resueltos	Ejercicios Completos	Ejercicios Correctos	Promedio
01	8	8	6	7	21	6	6	6	6
02	7	7	7	7	22	6	5	5	5
03	8	7	6	6.5	23	8	7	6	6.5
04	6	6	6	6	24	7	7	7	7
05	8	6	6	6	25	8	8	8	8
06	8	7	7	7	26	8	7	7	7
07	7	7	6	6.5	27	8	8	8	7.5
08	7	6	6	6	28	7	7	6	6.5
09	8	7	6	6.5	29	7	6	6	5.5
10	8	8	8	7	30	8	8	6	7
11	6	6	6	6	31	7	7	7	7
12	6	5	5	5	32	8	7	6	6.5
13	8	7	6	6.5	33	6	6	6	6
14	7	7	7	6.5	34	8	6	6	6
15	8	8	8	8	35	8	7	7	7
16	8	7	7	6.5	36	7	7	6	6.5
17	8	8	8	8	37	7	6	6	6
18	7	7	6	6.5	38	8	7	6	6.5
19	7	6	6	5.5	39	8	8	8	8
20	6	5	4	4.5	40	7	7	7	6.5

La Tabla 3 muestra información correspondiente a ocho ejercicios propuestos en el Tema I, donde se observa la cantidad de ejercicios entregados por cada estudiante, así como aquellos desarrollados en su totalidad y los solucionados de forma correcta.

Tabla 4. Resultados obtenidos de la revisión de ejercicios de los temas 2, 3 y 4.

ID	Tema 2	Tema 3	Tema 4		ID	Tema 2	Tema 3	Tema 4	
Estudian-te	Ejercicios Correctos	Ejercicios Correctos	Ejercicios Correctos	Promedio	Estudian-te	Ejercicios Correctos	Ejercicios Correctos	Ejercicios Correctos	Promedio
1	6	6	7	**6.3**	21	6	6	6	**6**
2	7	7	7	**7**	22	5	5	5	**5**
3	6	7	6	**6.3**	23	6	6	6	**6**
4	6	6	6	**6**	24	7	6	6	**6.3**
5	6	6	5	**5.7**	25	8	6	5	**6.3**
6	7	6	7	**6.7**	26	7	5	5	**5.7**
7	6	5	6	**5.7**	27	7	7	7	**7**
8	6	6	7	**6.3**	28	6	6	6	**6**
9	6	5	7	**6**	29	5	5	5	**5**
10	6	6	6	**6**	30	6	6	5	**5.7**
11	6	7	5	**6**	31	7	6	6	**6.3**
12	4	4	6	**4.7**	32	6	5	5	**5.3**
13	6	6	5	**5.7**	33	6	6	5	**5.7**
14	6	6	7	**6.3**	34	6	6	5	**5.7**
15	8	7	7	**7.3**	35	7	6	6	**6.3**
16	6	6	6	**6**	36	6	5	5	**5.3**
17	8	8	7	**7.7**	37	6	5	5	**5.3**
18	6	6	6	**6**	38	6	7	5	**6**
19	5	6	5	**5.3**	39	8	8	6	**7.3**
20	4	4	5	**4.3**	40	6	6	6	**6**

La Tabla 4 contiene el concentrado de los ocho ejercicios correspondientes a los Temas 2, 3 y 4 de la asignatura; los datos registrados muestran el puntaje obtenido de los ejercicios entregados por cada estudiante.

Tabla 5. Promedio de ejercicios entregados por tema de la población analizada.

	Tema 2	Tema 3	Tema4
Promedio ejercicios correctos	6.2	5.95	5.825
Calificación promedio de población	77.5	74.375	72.8125

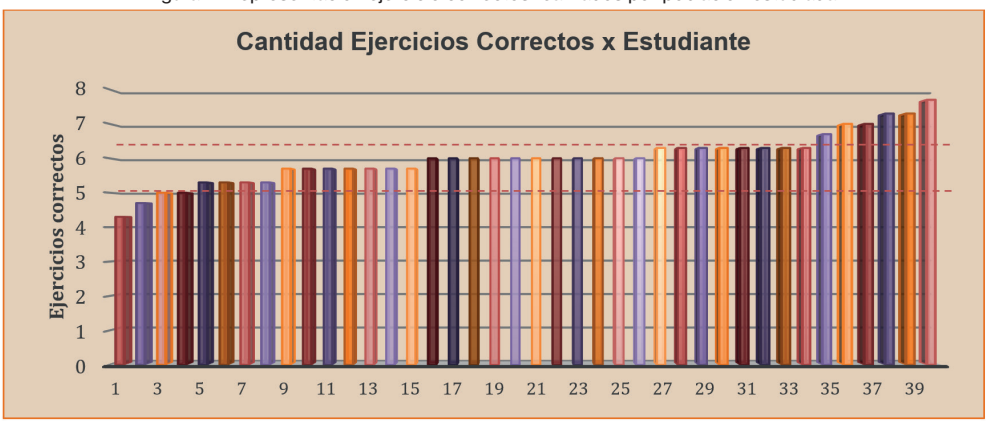
La Tabla 5 muestra que el promedio de ejercicios entregados en cada unidad se encuentra alrededor de 6, con una valoración de 75; al observar las calificaciones, es notoria la disminución del grupo al avanzar en cada tema, lo que indica un incremento de dificultad de los estudiantes para la resolución de ejercicios.

De acuerdo con el tipo de estudio y uso de la estadística descriptiva se obtuvo una media $(\bar{x}) = 5.825$ y una desviación estándar $\delta = 0.6827$. Por lo tanto, los límites del intervalo estándar son:

$$\bar{x} + \delta = 5.825 + 0.6827 = 6.5077$$

$$\bar{x} - \delta = 5.825 - 0.6827 = 5.1423$$

Figura 1. Representación ejercicio correctos realizados por población estudiada.



Los datos obtenidos permitieron conocer que dentro del intervalo estándar se encuentran un total de 30 estudiantes que entregan entre 6.5 y 5 ejercicios resueltos correctamente (véase la Figura 1). Sin embargo, el procesamiento de datos revela que un 20% de los estudiantes presenta dificultad para resolver los ejercicios correctamente, mientras que el 45% de los estudiantes entrega entre 5.5 y 6 ejercicios correctamente, con valoraciones alrededor de 70. Dichos datos muestran que un 65% de los estudiantes presentan dificultad para resolver correctamente los ejercicios de la materia. Para mayor claridad de la información, véase la Tabla 6.

Tabla 6. Clasificación de grupos por cantidad de ejercicios entregados.

Grupo	Cantidad Ejercicios Correctos	Valoración	Cantidad Estudiantes	Porcentaje
A	7.2- 8.0	90-100	1	2%
B	6.1 – 7.0	80-89	13	33%
C	5.5 - 6.0	70-79	18	45%
D	5.5 – 4.0	50-69	8	20%
			40	**100%**

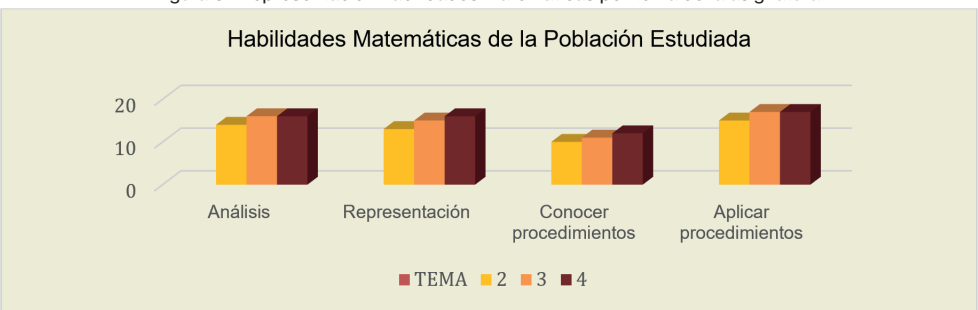
La clasificación de la Tabla 6 presenta cuatro grupos, donde se observa un total de ocho estudiantes pertenecientes al Grupo D, los cuales obtuvieron una valoración por debajo de 70. El Grupo C, con el 45%, indica que la mayor cantidad de estudiantes entrega un máximo de 6 ejercicios, mientras que un 33% entrega un máximo de siete ejercicios, y únicamente el 2% entrega todos los ejercicios correctos.

Tabla 7. Habilidades matemáticas aplicadas en la resolución de ejercicios de los temas 2,3,4.

TEMA	Análisis	Representación	Conocer procedimientos	Aplicar procedimientos
2	14	13	10	15
3	16	15	11	17
4	16	16	12	17

La Tabla 7 muestra la población de estudiantes que entregaron ejercicios y presentaron dificultad para solucionarlos de manera correcta (Grupos C y D de la Tabla 6). La revisión permitió conocer las habilidades matemáticas requeridas para desarrollar correctamente las soluciones de los ejercicios planteados, dejando en claro que las habilidades de análisis y aplicación son las que representan mayor dificultad (véase la Figura 3).

Figura 3. Representación habilidades matemáticas por tema de la asignatura.



7. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que del total de 40 estudiantes y las entregas de series de ejercicios de cada tema se pudo conocer que, por cada serie de ejercicios un 25% no es solucionado correctamente, alcanzando valoraciones de 75 en promedio por la mayoría de los estudiantes. También se pudo saber que el estándar de ejercicios entregados correctamente por los estudiantes oscila entre 5 y 6.5 ejercicios, abarcando un 65% de la población. Además, se pudo conocer que un porcentaje del 20% de los estudiantes

dentro del rango estándar tiene dificultad para resolver los ejercicios correctamente, mientras que el 45% de los estudiantes entregan entre 5.5 y 6 ejercicios correctamente, con valoraciones alrededor de 70; lo anterior significa que un 65% de los estudiantes presenta cierta dificultad para resolver ejercicios.

Además, en este estudio se logró conocer que del total de 40 estudiantes que presentaron ejercicios de los temas 2, 3 y 4, un alto porcentaje presentó falta de dominio en la mayoría de las habilidades matemáticas de análisis, representación de datos, conocimiento de procedimientos y aplicación de ellos; observando mayor dificultad en el análisis y aplicación de los métodos o procedimientos, es decir, los mayores problemas se observan al inicio y al final de la resolución de problemas.

Los resultados obtenidos en este estudio señalan que el 65% de los estudiantes que cursan la materia han presentado dificultades en la resolución de problemas; lo cual queda demostrado a través de la cantidad de ejercicios y las valoraciones obtenidas en la revisión de los mismos, debido entre otras cosas al dominio de las habilidades matemáticas requeridas para el desarrollo correcto de los ejercicios planteados en cada tema.

Lo anterior deja en claro la necesidad de fortalecer las habilidades matemáticas de los estudiantes durante todo el curso de Lenguajes y Autómatas I, puntualizando que para mejorar los indicadores presentados en relación a la resolución de problemas, el docente deberá ser claro y específico durante la explicación de soluciones a problemas, donde deberá indicar paso a paso, las operaciones realizadas, desde el planteamiento del problema hasta la aplicación y desarrollo del procedimiento utilizado. También es importante señalar que para mitigar la dificultad en la resolución de problemas matemáticos en los estudiantes el docente deberá proporcionar materiales de repaso de los temas con las competencias previas requeridas en cada tema.

REFERENCIAS

Barajas Arenas, C., Parada Rico, S. E., & Molina Zavaleta, J. G. (2017). Procedimientos Aritméticos en la Resolución de Problemas de Fenómenos Variacionales. *Boletim de Educación Matemática*.

Defaz Cruz, G. J. (2017). El desarrollo de habilidades cognitivas mediante la resolución de problemas matemáticos. *REVISTA CIENCIA E INVESTIGACIÓN*.

Escobar Medina, M. B. (Agosto de 2016). Influencia de la interacción alumno-docente en el proceso enseñanza-aprendizaje. *PAAKAT: Revista de Tecnología y Sociedad, 5*(8).

Gallego , D., Bustamante, L., Salcedo , L., Gava, M., & Alfaro, E. (2017). Estudio cuantitativo sobre las concepcionesde ciencia, metodología y enseñanza para profesores en formación. *Revista Lasillista de Investigación, 1*(14).

Lozada López, D. J. (2024). Didáctica de las matemáticas en carreras de ingeniería estrategias innovadoras para reducir la deserción estudiantil. *DialNet*.

Mallart, A., & Deulofeu, J. (2017). ESTUDIO DE INDICADORES DE CREATIVIDAD MATEMÁTICA EN LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS. *Revista Latinoamericana de Investigación en Matemática Educativa* .

Navas López, E. A. (2024). Relaciones entre la matemática, el pensamiento algorítmico y el pensamiento computacional. *Investigación Educativa de la Rediech*.

Orrantia, J. (2018). Dificultades en el aprendizaje de la matemáticas, una perspectiva evolutiva-. *Revista Psicopedagógica, 1*(1), 23.

Toro Carvajal, L. A., Hernán Ortiz, H., & Jiménez García , F. N. (2020). Solución de problemas complejos de ingeniería empleando sistemas cognitivos especializados como motivación en la enseñanza de matemáticas avanzadas para ingeniería. *Educación en Ingeniería*.

Torres Encalada, C. E., & Pogo Muñoz, V. E. (2024). Pensamiento Analítico-Matemático de los Estudiantes de Primer Ciclo de Ingeniería Electromecánica en la Universidad Nacional de Loja. *Ciencia Latina*.

Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM]. (2025). *Planes de Estudio de las Ciencias Físico-Matemáticas y de las Ingenierías: Requisitos y perfiles de ingreso para Matemáticas para el Desarrollo.* Cd. México: Dirección General de Orientación y Atención Educativa.

Vázquez Lezcano, C. J. (2025). Métodos de Enseñanza de la Matemática Aplicada a la Informática, Empleadas por los Docentes, en los Colegios que Implementan la Especialidad del Bachillerato Técnico en Informática en Ciudad De Pilar. Año 2025. *Ciencia Latina, Educación*.

Valbuena, R. (2025). *Ciencia Pura: Lógica de Procedimientos y razonamientos Científicos.* Ciencia Pura.

CAPÍTULO 16

ANÁLISIS MULTIVARIANTE DEL RENDIMIENTO ACADÉMICO MEDIANTE R: UN ENFOQUE PRÁCTICO Y REPRODUCIBLE

Data de submissão: 26/08/2026
Data de aceite: 10/09/2026

Alberto Hananel Baigorria
Filiación Institucional: Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
Facultad de Ingeniería
Chiclayo, Lambayeque, Perú
https://orcid.org/0000-0003-4113-8623

RESUMEN: Este capítulo presenta un enfoque práctico y reproducible para el análisis estadístico y multivariante del rendimiento académico mediante R. A partir de una base educativa compuesta por 150 observaciones y 29 variables, se desarrolla un recorrido progresivo que integra estadística descriptiva, pruebas de hipótesis, análisis de varianza, regresión múltiple, mediación, modelos de ecuaciones estructurales, análisis factorial exploratorio, análisis de componentes principales, análisis de conglomerados y Caras de Chernoff. El capítulo adopta una orientación aplicada, mostrando el código esencial, las salidas más relevantes y pautas para su interpretación. La secuencia permite conectar procedimientos que habitualmente se presentan de forma aislada y mantener la trazabilidad entre datos, código, resultados e interpretación. Finalmente, se incorpora un apéndice metodológico que sintetiza los principales comandos empleados y facilita la reproducción del recorrido analítico.
PALABRAS CLAVE: análisis multivariante; rendimiento académico; R; reproducibilidad; estadística aplicada.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PROPÓSITO Y ALCANCE DEL CAPÍTULO

El análisis multivariante permite estudiar conjuntamente múltiples variables y explorar relaciones y estructuras que difícilmente pueden identificarse mediante el examen aislado de cada variable (Hair et al., 2019; Rencher & Christensen, 2012). En el ámbito del rendimiento académico, la integración de procedimientos descriptivos, inferenciales y multivariantes permite avanzar desde la exploración inicial de los datos hasta la identificación de dimensiones y perfiles de estudiantes. R proporciona un entorno adecuado para articular estas etapas dentro de un mismo flujo de análisis.

Este capítulo presenta un enfoque práctico y reproducible para analizar datos educativos mediante R. Se utiliza una base de 150 observaciones y 29 variables relacionadas con evaluaciones y rendimiento académico.

El objetivo es mostrar, de forma secuencial, cómo implementar e interpretar procedimientos descriptivos, inferenciales y multivariantes dentro de un mismo flujo de trabajo, conservando el código esencial y sintetizando las salidas más relevantes. El recorrido se articula a partir de una secuencia de preguntas que acompañan el avance del análisis. En una primera etapa se examina cómo se distribuyen las calificaciones y si existen diferencias de rendimiento entre las metodologías consideradas. A partir de estos resultados, el análisis se orienta a determinar qué variables se relacionan con el promedio final y a examinar si la relación de la metodología con el rendimiento es directa o puede producirse indirectamente a través de otras variables de evaluación. Posteriormente, el interés se desplaza hacia la estructura multivariante de los datos, explorando la existencia de dimensiones latentes y la posibilidad de identificar perfiles de estudiantes. Finalmente, se aborda la representación conjunta de dichos perfiles mediante herramientas de visualización multivariante.

2. METODOLOGÍA

2.1. CONJUNTO DE DATOS Y ENTORNO DE TRABAJO

El análisis se desarrolla en R a partir del archivo datos_seminario.csv. La base contiene 150 observaciones y 29 variables de naturaleza numérica y categórica. Antes de iniciar la modelización se inspeccionan las primeras filas, la estructura de las variables y sus resúmenes básicos.

```
library(readr)
osteo <- read_csv("datos_seminario.csv", show_col_types = FALSE)
head(osteo)
```

Este bloque importa la base de datos desde un archivo CSV y muestra las primeras filas.

```
str(osteo)
summary(osteo)
```

Estos comandos permiten conocer la estructura de la base: tipo de variables, número de observaciones y resumen estadístico.

2.2. ESTRATEGIA DEL RECORRIDO ANALÍTICO

El recorrido se organiza de forma progresiva. Se inicia con la exploración descriptiva y gráfica de los datos; continúa con la comparación de grupos y las pruebas

de hipótesis; incorpora posteriormente ANOVA, regresión múltiple, mediación y modelos de ecuaciones estructurales; y culmina con correlaciones, análisis factorial, análisis de componentes principales, clustering y Caras de Chernoff. Esta secuencia permite utilizar cada procedimiento como una etapa del análisis y mantener la trazabilidad entre datos, código, resultados e interpretación.

3. RESULTADOS: DESARROLLO PRÁCTICO DEL ANÁLISIS EN R

3.1. ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE UNA VARIABLE

Se tomó como ejemplo la variable examen1.

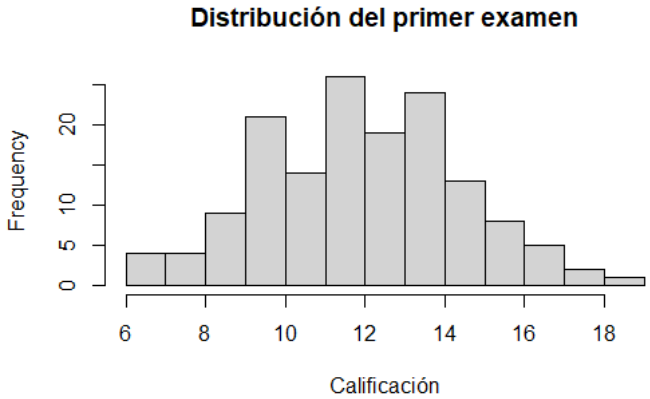
```
x <- osteo$examen1
resumen_x <- data.frame(
  Media = mean(x),
  DE = sd(x),
  Q1 = quantile(x, 0.25),
  Mediana = median(x),
  Q3 = quantile(x, 0.75),
  RIC = IQR(x)
)
knitr::kable(round(resumen_x, 2))
```

	Media	DE	Q1	Mediana	Q3	RIC
25%	12.42	2.51	10.54	12.36	14.07	3.53

El primer cuartil indica el valor por debajo del cual está el 25% de estudiantes. El tercer cuartil indica el valor por debajo del cual está el 75%. La diferencia entre ambos es el rango intercuartílico, que mide la variabilidad del 50% central de los datos.

3.2. TABLAS Y GRÁFICOS BÁSICOS

```
x <- round(x, 0)
hist(x, breaks = 10, main = "Distribución del primer examen", xlab = "Calificación")
```



El histograma resume la distribución de las calificaciones y permite valorar su forma general.

3.3. COMPARACIÓN ENTRE METODOLOGÍAS

Se separan los estudiantes según la metodología usada.

```
grupo1 <- subset(osteo, metodologia == “Tradicional”)
grupo2 <- subset(osteo, metodologia == “Innovadora”)

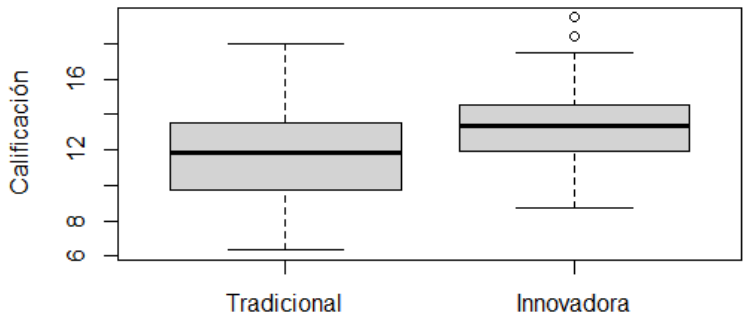
x1 <- grupo1$examen1
x2 <- grupo2$examen1
```

Aquí x1 contiene las notas del grupo tradicional y x2 las del grupo innovador.

```
medias_grupo <- data.frame(
  Metodologia = c(“Tradicional”, “Innovadora”),
  Media = c(mean(x1), mean(x2))
)
knitr::kable(
  medias_grupo,
  digits = 2
)
```

Metodologia	Media
Tradicional	11.61
Innovadora	13.26

```
boxplot(
 x1, x2,
 names = c("Tradicional", "Innovadora"),
 ylab = "Calificación"
)
```



3.4. PRUEBAS DE HIPÓTESIS

3.4.1. Normalidad

```
sh1 <- shapiro.test(x1)
sh2 <- shapiro.test(x2)
knitr::kable(data.frame(
 Grupo = c("Tradicional", "Innovadora"),
 W = c(unname(sh1$statistic), unname(sh2$statistic)),
 p = c(sh1$p.value, sh2$p.value)
), digits = 3)
```

Grupo	W	p
Tradicional	0.988	0.717
Innovadora	0.987	0.632

La prueba de Shapiro-Wilk evalúa si los datos siguen una distribución normal.

Hipótesis:

H0: los datos siguen distribución normal. H1: los datos no siguen distribución normal.

Si el p-valor es mayor que 0.05, no se rechaza la normalidad.

3.4.2. Comparación de varianzas

```
vt <- var.test(x1, x2)
knitr::kable(data.frame(
  F = unname(vt$statistic),
  p = vt$p.value
), digits = 3)
```

F	p
1.494	0.087

Hipótesis:

H0: las varianzas son iguales. H1: las varianzas son diferentes.

3.4.3. Prueba t de Student

```
tt <- t.test(x1, x2, var.equal = TRUE)
knitr::kable(data.frame(
  t = unname(tt$statistic),
  gl = unname(tt$parameter),
  p = tt$p.value,
  Dif_media = mean(x1) - mean(x2)
), digits = 3)
```

t	gl	p	Dif_media
-4.264	148	0	-1.657

Hipótesis:

H0: las medias son iguales. H1: las medias son diferentes.

Si el p-valor es menor que 0.05, existe diferencia estadísticamente significativa entre grupos.

3.5. ANOVA PARA COMPARAR EL RENDIMIENTO SEGÚN METODOLOGÍA

```
anova1 <- aov(promedio_final ~ metodologia, data = osteo)
anova_tab <- summary(anova1)[[1]]
knitr::kable(anova_tab, digits = 3)
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
metodologia	1	12.766	12.766	14.088	0
Residuals	148	134.114	0.906	NA	NA

El ANOVA permite evaluar si la metodología influye sobre el promedio final.

Hipótesis:

H0: el promedio final es igual en ambas metodologías. H1: el promedio final difiere según metodología.

Si el p-valor es menor que 0.05, se concluye que la metodología influye significativamente en el rendimiento.

3.6. TAMAÑO DEL EFECTO

```
eta2 <- 12.76617 / (12.76617 + 134.11401)
round(100 * eta2, 1)
## [1] 8.7
```

El tamaño del efecto mide qué porcentaje de la variabilidad del rendimiento es explicado por la metodología.

En este caso, la metodología explica aproximadamente el 8.7% del rendimiento, lo cual puede interpretarse como un efecto moderado en educación.

3.7. REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

```
modelo <- lm(promedio_final ~ metodologia + examen1 + AV_EX + AV_PA, data = osteo)
coef_tab <- summary(modelo)$coefficients
knitr::kable(round(coef_tab, 3))
```

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(>|t|)
(Intercept)	8.603	0.610	14.101	0.000
metodologiaTradicional	-0.174	0.121	-1.437	0.153
examen1	-0.060	0.045	-1.323	0.188
AV_EX	0.398	0.053	7.484	0.000
AV_PA	0.084	0.028	3.023	0.003

La regresión lineal múltiple permite examinar la relación entre una variable respuesta y un conjunto de variables explicativas, considerando simultáneamente su contribución al modelo (Montgomery et al., 2021).

Aquí se analiza si la metodología sigue siendo importante cuando se controlan otras variables como AV_EX y AV_PA.

Resultado conceptual:

La metodología parecía importante inicialmente. Pero al incluir las evaluaciones continuas, su efecto directo desaparece. Esto sugiere que la metodología podría actuar de forma indirecta.

3.8. PLANTEAMIENTO DE MEDIACIÓN

El análisis de mediación permite examinar si la relación entre una variable antecedente y una variable resultado puede operar a través de una o más variables intermedias (Hayes, 2022).

La hipótesis es:

metodología → evaluaciones continuas → promedio final

Es decir, la metodología mejora las evaluaciones continuas, y estas a su vez mejoran el promedio final.

```
m1 <- lm(AV_EX ~ metodologia, data = osteo)
m2 <- lm(AV_PA ~ metodologia, data = osteo)
med_tab <- rbind(
  AV_EX = summary(m1)$coefficients[2, c(1,2,4)],
  AV_PA = summary(m2)$coefficients[2, c(1,2,4)]
)
colnames(med_tab) <- c("Estimacion","EE","p")
knitr::kable(round(med_tab, 3))
```

	Estimacion	EE	p
AV_EX	-1.067	0.332	0.002
AV_PA	-1.000	0.331	0.003

Estos modelos evalúan si la metodología influye sobre las variables mediadoras.

3.9. MODELO SEM DE MEDIACIÓN

Los modelos de ecuaciones estructurales permiten estimar simultáneamente sistemas de relaciones entre variables y constituyen una extensión flexible de diferentes procedimientos de modelización multivariante (Kline, 2023). Para su estimación se utiliza en este capítulo el paquete lavaan de R (Rosseel, 2012).

```
library(lavaan)
library(semPlot)
```

lavaan sirve para ajustar modelos de ecuaciones estructurales. semPlot sirve para graficarlos.

```
osteo$metodologia_num <- ifelse(osteo$metodologia == "Tradicional", 0, 1)
```

Se convierte la metodología en variable numérica.

```
modelo_sem <- '
 AV_EX ~ a1*metodologia_num
 AV_PA ~ a2*metodologia_num

 promedio_final ~ cprime*metodologia_num + b1*AV_EX + b2*AV_PA

 indirecto_AVEX := a1*b1
 indirecto_AVPA := a2*b2
 indirecto_total := (a1*b1) + (a2*b2)
 total := cprime + (a1*b1) + (a2*b2)
'
```

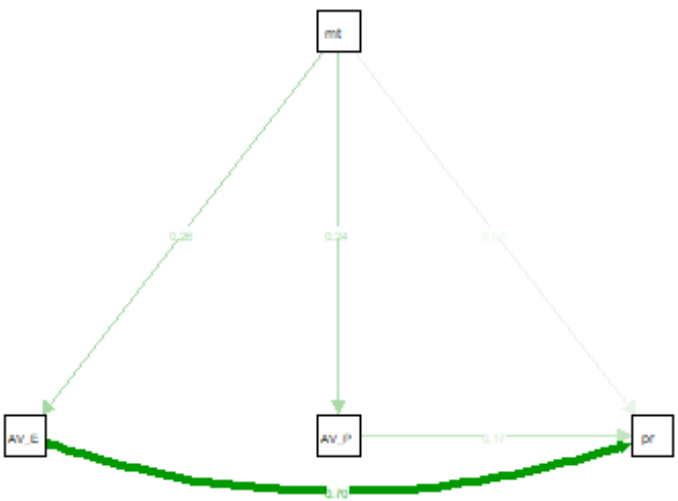
Este modelo estima: efecto de la metodología sobre AV_EX, efecto de la metodología sobre AV_PA, efecto de AV_EX y AV_PA sobre el promedio final, efecto directo de metodología sobre promedio final y efectos indirectos.

```
ajuste_sem <- sem(modelo_sem, data = osteo)
pe <- parameterEstimates(
 ajuste_sem,
 standardized = TRUE
)
sem_res <- subset(
 pe,
 op %in% c("~", ":="),
 select = c(lhs, op, rhs, est, se, pvalue, std.all)
)
knitr::kable(
 sem_res,
 digits = 3
)
```

	lhs	op	rhs	est	se	pvalue	std.all
1	AV_EX	~	metodologia_num	1.067	0.330	0.001	0.255
2	AV_PA	~	metodologia_num	1.000	0.328	0.002	0.241
3	promedio_final	~	metodologia_num	0.139	0.116	0.228	0.069
4	promedio_final	~	AV_EX	0.338	0.027	0.000	0.699
5	promedio_final	~	AV_PA	0.084	0.027	0.002	0.172
10	indirecto_AVEX	:=	a1*b1	0.360	0.115	0.002	0.178
11	indirecto_AVPA	:=	a2*b2	0.084	0.039	0.030	0.041
12	indirecto_total	:=	(a1*b1)+(a2*b2)	0.444	0.121	0.000	0.220
13	total	:=	cprime+(a1*b1)+(a2*b2)	0.584	0.158	0.000	0.289

Este resumen permite interpretar coeficientes estandarizados, ajuste del modelo y R^2. Finalmente se realiza el gráfico del modelo SEM.

```
semPaths(ajuste_sem,
      what = "std",
      whatLabels = "std",
      layout = "tree",
      residuals = FALSE,
      intercepts = FALSE)
```

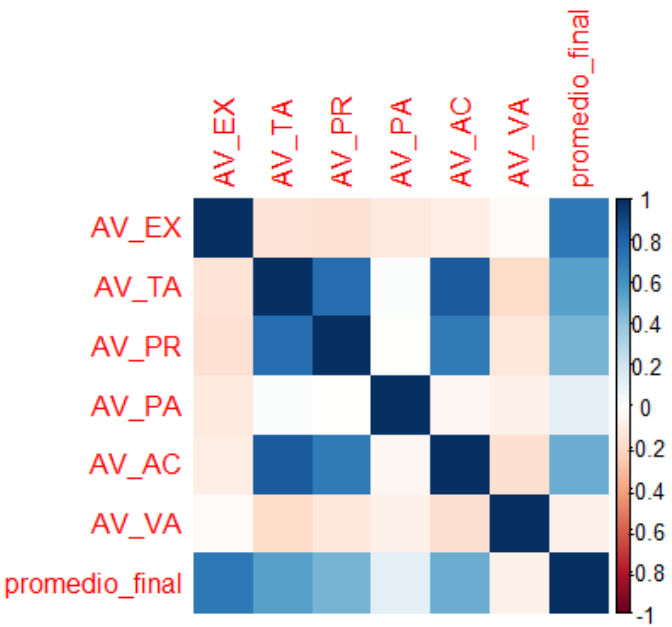


Conclusión:

La metodología tiene un efecto directo reducido sobre el rendimiento final, pero influye indirectamente a través de las evaluaciones continuas.

3.10. CORRELACIONES ENTRE VARIABLES DE EVALUACIÓN

```
variables <- osteo[, c("AV_EX", "AV_TA", "AV_PR", "AV_PA", "AV_AC", "AV_VA", "promedio_final")]
library(corrplot)
corrplot(cor(variables), method = "color")
```



Interpretación:

Colores intensos indican correlaciones fuertes. Variables muy correlacionadas podrían medir dimensiones parecidas. Esto prepara el camino para análisis factorial y ACP.

3.11. COMPARACIÓN DE MODELOS

```
modelo_full <- lm(promedio_final ~ metodologia + examen1 + AV_EX + AV_PA, data = osteo)
modelo_reducido <- lm(promedio_final ~ metodologia + AV_EX + AV_PA, data = osteo)
comp <- anova(modelo_full, modelo_reducido)
knitr::kable(comp, digits = 3)
```

Res.Df	RSS	Df	Sum of Sq	F	Pr(>F)
145	65.527	NA	NA	NA	NA
146	66.318	-1	-0.791	1.751	0.188

Este ANOVA compara dos modelos anidados.

Hipótesis:

H0: la variable eliminada no aporta significativamente. H1: la variable eliminada sí aporta significativamente.

Si el p-valor es grande, se prefiere el modelo reducido por parsimonia.

```
ic <- data.frame(
  Modelo = c("Completo", "Reducido"),
  AIC = c(AIC(modelo_full), AIC(modelo_reducido)),
  BIC = c(BIC(modelo_full), BIC(modelo_reducido))
)
knitr::kable(
  ic,
  digits = 2
)
```

Modelo	AIC	BIC
Completo	313.46	331.52
Reducido	313.26	328.31

AIC y BIC comparan modelos considerando ajuste y complejidad.

Regla:

Menor AIC/BIC indica mejor modelo. Si la diferencia es pequeña, se prefiere el modelo más simple.

3.12. PREPARACIÓN PARA ANÁLISIS FACTORIAL

```
evaluaciones <- osteo[, c("examen1", "examen2", "examen3", "tarea1", "tarea2",
                          "tarea3", "proyecto1", "proyecto2", "participacion",
                          "presentacion", "actividad1", "actividad2", "AV_VA")]
```

Se seleccionan variables relacionadas con evaluación académica.

```
evaluaciones_reducido <-
 evaluaciones[, !names(evaluaciones) %in% c("participacion", "presentacion")]
```

Se eliminan variables problemáticas detectadas por KMO.

3.13. KMO Y PRUEBA DE BARTLETT

Antes de realizar un análisis factorial resulta conveniente examinar si la estructura de correlaciones presenta una adecuación suficiente para la factorización (Hair et al., 2019).

```
library(psych)
KMO(cor(evaluaciones_reducido))

## Kaiser-Meyer-Olkin factor adequacy
## Call: KMO(r = cor(evaluaciones_reducido))
## Overall MSA =  0.89
## MSA for each item =
##    examen1    examen2    examen3     tarea1     tarea2     tarea3  proyecto1  proyecto2
##       0.74       0.74       0.68       0.89       0.92       0.90       0.96       0.91
## actividad1 actividad2     AV_VA
##       0.95       0.93       0.70
```

El KMO evalúa si los datos son adecuados para análisis factorial.

Interpretación general:

KMO > 0.80: muy bueno. KMO entre 0.70 y 0.80: bueno. KMO < 0.50: problemático.

```
cortest.bartlett(cor(evaluaciones), n = nrow(evaluaciones))

## $chisq
## [1] 1022.931
##
## $p.value
## [1] 1.328123e-164
##
## $df
## [1] 78
```

Bartlett evalúa si la matriz de correlaciones es una matriz identidad.

Hipótesis:

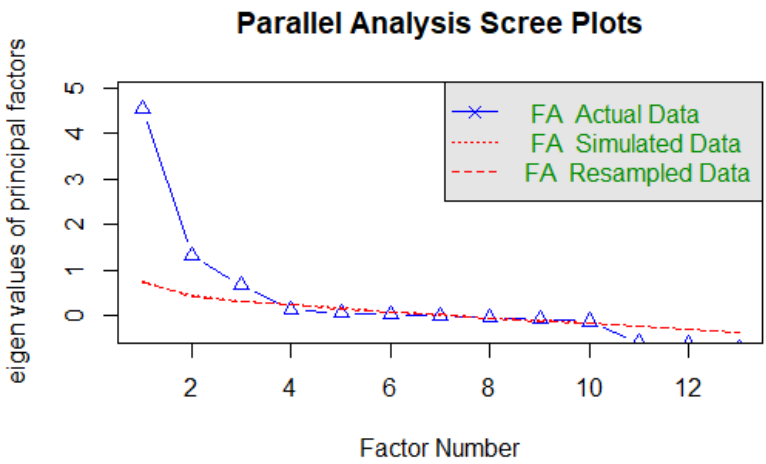
H0: las variables no están correlacionadas. H1: las variables sí están correlacionadas.

Si p < 0.05, es adecuado aplicar análisis factorial o ACP.

3.14. ANÁLISIS PARALELO

El análisis paralelo compara los valores propios observados con los obtenidos a partir de datos aleatorios y constituye un criterio para orientar la retención de factores (Horn, 1965).

```
fa.parallel(evaluaciones, fa = "fa")
```




```
## Parallel analysis suggests that the number of factors =  3  and the number of components =  NA
```

El análisis paralelo ayuda a decidir cuántos factores retener.

Regla:

Se conservan los factores cuyos eigenvalores reales superan a los eigenvalores simulados.

Interpretación:

Si sugiere 3 factores, se puede iniciar con una solución trifactorial. Luego se puede refinar el modelo según coherencia teórica y cargas factoriales.

3.15. ANÁLISIS FACTORIAL EXPLORATORIO

Se exploró inicialmente una solución de tres factores. Tras revisar comunalidades y claridad interpretativa, se depuraron variables con comportamiento problemático y se adoptó una solución más parsimoniosa de dos factores.

3.16. MODELO FACTORIAL FINAL DE DOS FACTORES

```
library(dplyr)
evaluaciones_final2 <- evaluaciones %>%
  select(-participacion, -presentacion, -AV_VA)

famodelos <- fa(evaluaciones_final2, nfactors = 2, rotate = "oblimin")
cargas <- as.data.frame(unclass(famodelos$loadings))
knitr::kable(round(cargas, 2))
```

	MR1	MR2
examen1	-0.05	0.80
examen2	0.00	0.77
examen3	0.05	0.78
tarea1	0.90	0.04
tarea2	0.88	0.00
tarea3	0.87	-0.07
proyecto1	0.70	0.05
proyecto2	0.65	-0.12
actividad1	0.77	0.03
actividad2	0.78	0.03

Este modelo resultó más claro y parsimonioso.

Interpretación final:

Factor 1: Evaluación continua y desempeño práctico. Incluye: tareas, proyectos, actividades.

Factor 2: Evaluación teórica. Incluye: examen1, examen2, examen3.

Conclusión:

El rendimiento académico presenta una estructura bidimensional: lo que el estudiante realiza durante el curso y lo que demuestra en exámenes.

3.17. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

El análisis de componentes principales (ACP) permite reducir la dimensionalidad de un conjunto de variables mediante componentes que concentran progresivamente la variabilidad de los datos (Jolliffe & Cadima, 2016).

```
pca <- prcomp(evaluaciones, scale. = TRUE); var_pca <- 100 * (pca$sdev^2 /
sum(pca$sdev^2))
knitr::kable(data.frame(Componente = paste0("PC", 1:3),
Varianza = round(var_pca[1:3], 1), Acumulada = round(cumsum(var_pca)[1:3], 1)))
```

Componente	Varianza	Acumulada
PC1	37.8	37.8
PC2	17.4	55.2
PC3	12.8	67.9

El ACP reduce la dimensionalidad de los datos. scale. = TRUE estandariza las variables. La salida muestra: Desviación estándar de cada componente, proporción de varianza explicada, varianza acumulada.

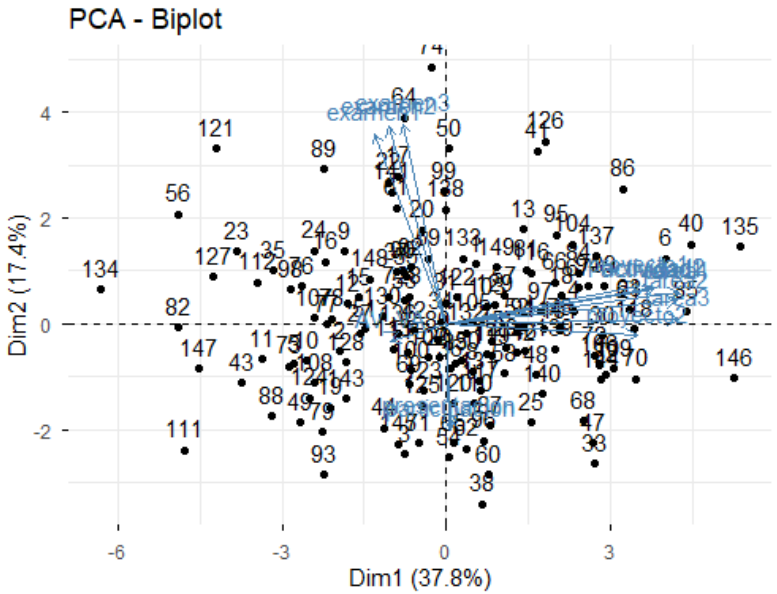
Interpretación:

PC1 explica aproximadamente 38%. PC2 explica aproximadamente 17%. PC3 explica aproximadamente 13%. Las dos primeras dimensiones explican cerca del 55%. Las tres primeras explican cerca del 68%.

3.18. ACP CON FACTOMINER Y FACTOEXTRA

Para complementar el análisis se utiliza FactoMineR, para el análisis multivariante en R (Lê et al., 2008).

```
library(FactoMineR); library(factoextra)
res_pca <- PCA(evaluaciones, scale.unit = TRUE, graph = FALSE); fviz_pca_biplot(res_
pca)
```



Conclusión:

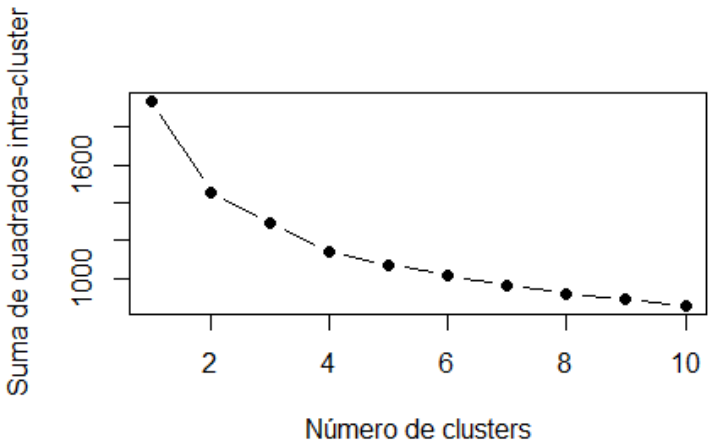
El ACP confirma dos dimensiones del rendimiento académico: evaluación continua y evaluación teórica.

3.19. CLUSTERING CON K-MEANS

El análisis de conglomerados busca identificar grupos de observaciones con características internamente similares a partir de la información multivariante disponible (Everitt et al., 2011).

3.19.1. Método del codo

```
wss <- numeric(10); for (i in 1:10) {
km <- kmeans(scale(evaluaciones), centers = i, nstart = 25); wss[i] <- km$tot.withinss};
plot(1:10, wss, type = "b", pch = 19,
     xlab = "Número de clusters", ylab = "Suma de cuadrados intra-cluster")
```



Este código prueba de 1 a 10 clusters y calcula la suma de cuadrados intra-cluster. El "codo" indica el número recomendado de grupos.

Interpretación:

El gráfico sugiere conservar 3 clusters, porque a partir de ese punto la mejora disminuye.

3.19.2. Modelo k-means con 3 clusters

```
set.seed(123); km3 <- kmeans(scale(evaluaciones), centers = 3, nstart = 25)
osteo$cluster <- factor(km3$cluster)

table(osteo$cluster)

##
##  1  2  3
## 59 46 45
centros_cluster <- aggregate(evaluaciones, by = list(cluster = km3$cluster), mean)
knitr::kable(round(centros_cluster[,
c("cluster","examen1","tarea1","proyecto1","actividad1")], 2))
```

cluster	examen1	tarea1	proyecto1	actividad1
1	10.99	13.79	15.48	12.61
2	14.45	12.56	14.39	11.91
3	12.23	16.44	16.83	14.24

Calcula el promedio de cada variable por cluster.

3.20. INTERPRETACIÓN DE CLUSTERS

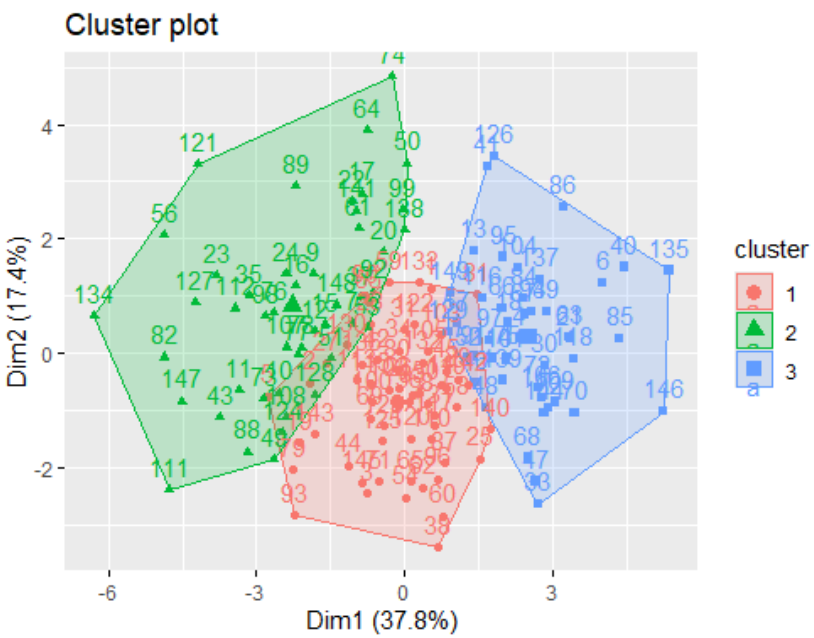
Se identificaron tres perfiles: **estudiantes teóricos** (cluster 1), con mayor rendimiento en exámenes; **estudiantes de alto rendimiento integral** (cluster 2), con mejor desempeño en la evaluación continua; y **estudiantes de rendimiento medio o vulnerable** (cluster 3), con un desempeño intermedio sin un patrón claramente destacado.

Conclusión:

El rendimiento académico no es homogéneo. Existen perfiles diferenciados de estudiantes según el tipo de evaluación en el que destacan.

3.21. VISUALIZACIÓN DE CLUSTERS

```
fviz_cluster(km3, data = scale(evaluaciones))
```



Este gráfico proyecta los clusters en las dos primeras dimensiones principales.

Interpretación:

Cada punto es un estudiante. Cada color es un cluster. Si los grupos están separados, la clasificación es razonable.

Conclusión:

El gráfico confirma la existencia de tres perfiles diferenciados de estudiantes, coherentes con la estructura bidimensional detectada por ACP y análisis factorial.

3.22. CARAS DE CHERNOFF

Las Caras de Chernoff constituyen una representación gráfica multivariante en la que diferentes variables se asignan a rasgos faciales, permitiendo representar conjuntamente varias dimensiones de cada perfil (Chernoff, 1973). Para evitar la saturación visual que producirían 150 rostros, la representación se realiza únicamente sobre los centroides de los conglomerados.

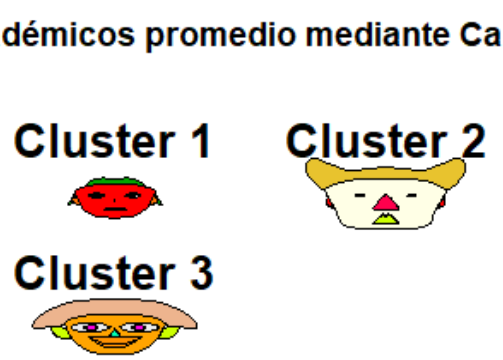
3.23. CARAS PROMEDIO POR CLUSTER

La mejor estrategia es dibujar una cara por cluster.

```
library(aplpack)
centros <- aggregate(evaluaciones,
                     by = list(cluster = km3$cluster),
                     mean)

chernoff_cluster <- centros[, c("examen1", "examen2", "examen3",
                                "tarea1", "tarea2", "tarea3",
                                "proyecto1", "proyecto2",
                                "participacion", "presentacion")]

faces(chernoff_cluster,
      labels = paste("Cluster", centros$cluster),
      main = "Perfiles académicos promedio mediante Caras de Chernoff")
```



```
## effect of variables:
##  modified item        Var
## “height of face     “ “examen1”
## “width of face      “ “examen2”
## “structure of face” “examen3”
## “height of mouth “  “tarea1”
## “width of mouth “   “tarea2”
## “smiling        “   “tarea3”
## “height of eyes  “  “proyecto1”
## “width of eyes   “  “proyecto2”
## “height of hair  “  “participacion”
## “width of hair   “  “presentacion”
## “style of hair   “  “examen1”
## “height of nose  “  “examen2”
## “width of nose   “  “examen3”
## “width of ear    “  “tarea1”
## “height of ear   “  “tarea2”
```

Interpretación:

Cada cara representa el perfil promedio de un cluster. Las diferencias faciales resumen diferencias académicas. Es una visualización innovadora para perfiles multivariantes.

Texto para informe:

Las caras de Chernoff se construyeron a partir de los centroides de los clusters identificados mediante k-means. Esta representación permite comparar visualmente los perfiles académicos promedio, destacando diferencias entre evaluación teórica, trabajo continuo, proyectos y participación.

4. DISCUSIÓN

4.1. INTEGRACIÓN DEL RECORRIDO ANALÍTICO

El análisis siguió la siguiente lógica:

Datos educativos

→ Estadística descriptiva
→ Comparación de metodologías

→ Pruebas de hipótesis
→ ANOVA
→ Regresión
→ Mediación y SEM
→ Correlaciones
→ KMO y prueba de Bartlett
→ Análisis factorial
→ ACP
→ Clustering
→ Caras de Chernoff

El recorrido integra procedimientos que habitualmente se estudian de forma aislada. La descriptiva caracteriza los datos; la inferencia examina diferencias; la regresión y la mediación estudian asociaciones; y las técnicas multivariantes permiten identificar dimensiones y perfiles. R facilita reproducir cada etapa a partir del mismo conjunto de datos y del código documentado. El análisis factorial, el ACP, el clustering y las Caras de Chernoff aportan perspectivas complementarias para resumir, clasificar y comunicar la estructura observada.

4.2. ALCANCE Y CONSIDERACIONES DE LA APLICACIÓN

Los resultados deben interpretarse dentro del carácter didáctico de la base y del propósito demostrativo del capítulo. Las salidas obtenidas ilustran cómo ejecutar e interpretar los procedimientos, pero no deben considerarse por sí solas evidencia causal ni generalizarse a otras poblaciones educativas. Del mismo modo, decisiones como la selección de variables, el número de factores o componentes y el número de clusters influyen en las soluciones obtenidas y deben justificarse de acuerdo con el problema de investigación.

5. PRINCIPALES COMANDOS UTILIZADOS EN R

Esta sección resume los principales comandos empleados en el recorrido analítico. Su finalidad es servir como referencia rápida para reproducir las etapas desarrolladas en el capítulo.

5.1. EXPLORACIÓN Y ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

Comando	¿Para qué sirve?
library(readr)	Carga el paquete para importar archivos CSV.
read_csv("archivo.csv")	Importa una base de datos.
head(datos)	Muestra las primeras filas.
summary(datos)	Resume estadísticamente las variables.
mean(x)	Calcula la media.
sd(x)	Calcula la desviación estándar.
quantile(x)	Calcula cuartiles.
table(x)	Obtiene frecuencias.
hist(x)	Genera un histograma.
boxplot(x)	Genera un diagrama de caja.

5.2. INFERENCIA Y MODELIZACIÓN

Comando	¿Para qué sirve?
shapiro.test(x)	Evalúa normalidad.
var.test(x1, x2)	Compara varianzas entre dos grupos.
t.test(x1, x2)	Compara medias.
aov(y ~ grupo, data = datos)	Ajusta un ANOVA.
lm(y ~ x1 + x2, data = datos)	Ajusta una regresión lineal.
anova(modelo1, modelo2)	Compara modelos anidados.
AIC(modelo1, modelo2)	Compara modelos según ajuste y complejidad.
BIC(modelo1, modelo2)	Compara modelos penalizando la complejidad.

5.3. MEDIACIÓN Y MODELOS DE ECUACIONES ESTRUCTURALES

Comando	¿Para qué sirve?
library(lavaan)	Carga funciones para modelos SEM.
sem(modelo_sem, data = datos)	Ajusta un modelo de ecuaciones estructurales.
parameterEstimates(ajuste_sem)	Extrae estimaciones de los parámetros.
semPaths(ajuste_sem)	Representa gráficamente el modelo SEM.

5.4. REDUCCIÓN DIMENSIONAL

Comando	¿Para qué sirve?
KMO(cor(datos))	Evalúa la adecuación muestral.
cortest.bartlett(cor(datos), n = nrow(datos))	Aplica la prueba de Bartlett.
fa.parallel(datos, fa = "fa")	Sugiere el número de factores.
fa(datos, nfactors = 2, rotate = "oblimin")	Ajusta un análisis factorial exploratorio.

Comando	¿Para qué sirve?
prcomp(datos, scale. = TRUE)	Realiza un ACP con estandarización.
PCA(datos, scale.unit = TRUE, graph = FALSE)	Realiza ACP mediante FactoMineR.
fviz_pca_biplot(res_pca)	Genera un biplot.

5.5. PERFILES MULTIVARIANTES

Comando	¿Para qué sirve?
scale(datos)	Estandariza variables.
kmeans(scale(datos), centers = 3, nstart = 25)	Aplica k-means.
aggregate(datos, by = list(cluster), mean)	Calcula centroides por cluster.
fviz_cluster(km3, data = scale(datos))	Visualiza los clusters.
aplpack::faces(datos)	Genera Caras de Chernoff.

5.6. SÍNTESIS DEL FLUJO ANALÍTICO

El recorrido desarrollado en el capítulo puede resumirse como:

Datos educativos → exploración descriptiva → comparación de grupos → pruebas de hipótesis → ANOVA → regresión → mediación y SEM → correlaciones → KMO y Bartlett → análisis factorial → ACP → clustering → Caras de Chernoff.

6. CONCLUSIONES

El recorrido muestra que el rendimiento académico puede examinarse desde distintas perspectivas y no únicamente a partir de una nota final. En el caso analizado se identificaron dimensiones asociadas con la evaluación continua y la evaluación teórica, así como perfiles multivariantes diferenciados obtenidos mediante técnicas de agrupamiento. En conjunto, se muestra cómo R puede utilizarse para articular un flujo reproducible que conecta exploración, inferencia, modelización, reducción dimensional, clasificación y visualización. Su principal valor es operativo y docente: ofrecer una secuencia de trabajo que permita comprender qué hace cada técnica, cómo implementarla y cómo interpretar sus resultados dentro de un mismo recorrido analítico.

7. AGRADECIMIENTOS

Este capítulo constituye un resultado de investigación desarrollado en el marco de una movilidad docente Erasmus+ del autor, bajo su filiación con la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo (USAT, Perú), en el Doctorado Interuniversitario en Equidad e Innovación en Educación de la Universidad de Vigo (España). El trabajo se

deriva del seminario *Análisis multivariante de datos en investigación educativa mediante software libre*.

REFERENCIAS

Chernoff, H. (1973). The use of faces to represent points in -dimensional space graphically. *Journal of the American Statistical Association*, *68*(342), 361–368. https://doi.org/10.1080/01621459.1973.10482434

Everitt, B. S., Landau, S., Leese, M., & Stahl, D. (2011). *Cluster analysis* (5th ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470977811

Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate data analysis* (8th ed.). Cengage.

Hayes, A. F. (2022). *Introduction to mediation, moderation, and conditional process analysis: A regression-based approach* (3rd ed.). Guilford Press.

Horn, J. L. (1965). A rationale and test for the number of factors in factor analysis. *Psychometrika*, *30*(2), 179–185. https://doi.org/10.1007/BF02289447

Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, *374*(2065), 20150202. https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202

Kline, R. B. (2023). *Principles and practice of structural equation modeling* (5th ed.). Guilford Press.

Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: An R package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software*, *25*(1), 1–18. https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01

Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to linear regression analysis* (6th ed.). Wiley.

Rencher, A. C., & Christensen, W. F. (2012). *Methods of multivariate analysis* (3rd ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118391686

Rosseel, Y. (2012). lavaan: An R package for structural equation modeling. *Journal of Statistical Software*, *48*(2), 1–36. https://doi.org/10.18637/jss.v048.i02

CAPÍTULO 17

COMPUTACIÓN AFECTIVA Y DISEÑO TECNOPEDAGÓGICO DE SISTEMAS DE MUNDO VIRTUAL PARA EL ENTRENAMIENTO SOCIOEMOCIONAL DOCENTE: REQUERIMIENTOS, COMPONENTES, PARÁMETROS DE INMERSIÓN Y EL MODELO SEED DE DESARROLLO PSICOEMOCIONAL SIMULADO

Data de submissão: 06/09/2026
Data de aceite: 21/09/2026

Fabiola Sáez-Delgado
Research and Innovation Group in Socioemotional Learning, Well-Being and Mental Health to Foster Thriving (THRIVE4ALL)
Facultad de Educación
Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile
https://orcid.org/0000-0002-7993-5356

Pilar Jara-Coatt
Research and Innovation Group in Socioemotional Learning, Well-Being and Mental Health to Foster Thriving (THRIVE4ALL)
Facultad de Educación
Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile
https://orcid.org/0000-0002-9975-8713

Javier Mella-Norambuena
Departamento de Ciencias
Universidad Técnica Federico Santa María
Concepción, Chile
https://orcid.org/0000-0002-4288-142X

Paulo César Coronado-Sánchez
Doctorado Interinstitucional de Educación
Facultad de Ciencias y Educación
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
https://orcid.org/0000-0003-2980-2376

Paula Correa-Gutiérrez
Programa de Doctorado en Innovación Educativa
Facultad de Educación
Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile
https://orcid.org/0009-0009-0484-639X

RESUMEN: Este capítulo sistematiza, desde los fundamentos de la computación afectiva y la ingeniería de software, los requerimientos funcionales y no funcionales, la arquitectura distribuida multicapa y los principios tecnopedagógicos que articulan un Sistema de Mundo Virtual para el Entrenamiento Socioemocional Docente (SMV-ESD). El propósito central es caracterizar un entorno sintético regulado orientado al fortalecimiento de la autorregulación emocional, la desescalada de conflictos e incidentes críticos de aula, y la resiliencia del profesorado. Se revisa evidencia empírica reciente sobre simulación inmersiva en formación docente, agentes conversacionales adaptativos basados en modelos de lenguaje de gran escala (LLM), analítica multimodal del aprendizaje (MMLA) y biorretroalimentación psicofisiológica síncrona (HRV, GSR, pupilometría). Asimismo, se analizan los desafíos éticos en la gobernanza de datos biométricos sensibles, los cuellos de botella de latencia vocal sub-segundo y los estándares de interoperabilidad técnica (IEEE xAPI e ISO/IEC 25010). Como contribución

original, se formula el Modelo SEED (Socio-Emotional Educator Development Model), una propuesta teórica y pedagógica en cuatro fases (Sensitización, Exposición, Escalamiento regulado y Debriefing) diseñada para estructurar trayectorias de simulación progresiva y sentar las bases metodológicas para su posterior validación empírica. El capítulo concluye trazando las líneas de investigación futuras y una agenda aplicada para la evaluación piloto del modelo en entornos de educación superior y formación continua.
PALABRAS CLAVE: mundo virtual; computación afectiva; entrenamiento socioemocional docente; realidad virtual inmersiva; biorretroalimentación; arquitectura de software; agentes conversacionales basados en LLM; fidelidad psicológica; Modelo SEED; analítica multimodal del aprendizaje.

AFFECTIVE COMPUTING AND THE TECHNOPEDAGOGICAL DESIGN OF VIRTUAL WORLD SYSTEMS FOR TEACHERS' SOCIO-EMOTIONAL TRAINING: REQUIREMENTS, COMPONENTS, IMMERSION PARAMETERS, AND THE SEED MODEL FOR SIMULATED PSYCHO-EMOTIONAL DEVELOPMENT

ABSTRACT: This chapter systematizes, from the perspectives of affective computing and software engineering, the functional and non-functional requirements, layered software architecture, and technopedagogical principles required to design a Virtual World System for Teacher Socioemotional Training (SMV-ESD). The primary goal is to characterize a regulated synthetic environment aimed at fostering emotional self-regulation, conflict de-escalation during critical classroom incidents, and teacher resilience. Recent empirical evidence on immersive simulation in teacher education, adaptive conversational agents powered by large language models (LLMs), multimodal learning analytics (MMLA), and synchronous psychophysiological biofeedback (HRV, GSR, eye-tracking/pupillometry) is comprehensively reviewed. Furthermore, the chapter addresses key challenges regarding the ethical governance of sensitive biometric data, sub-second vocal latency bottlenecks, and technical interoperability standards (IEEE xAPI and ISO/IEC 25010). As an original contribution, the chapter introduces the SEED Model (Socio-Emotional Educator Development Model), a four-stage developmental framework (Sensitization, Exposure, Escalation, and Debriefing) designed to structure progressive virtual-world simulations and lay the methodological foundation for future empirical validation. The chapter closes with future research avenues and an applied agenda for pilot testing the proposed model within teacher education programs.
KEYWORDS: virtual world; affective computing; teacher socioemotional training; immersive virtual reality; biofeedback; software architecture; LLM-based conversational agents; psychological fidelity; SEED Model; multimodal learning analytics.

1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo analiza y sistematiza las bases tecnopedagógicas, los parámetros de inmersión y la arquitectura de software necesaria para el desarrollo de un Sistema de Mundo Virtual orientado al Entrenamiento Socioemocional Docente (SMV-ESD). El propósito central es caracterizar las condiciones técnicas, funcionales y de procesamiento

de datos biométricos en tiempo real que permiten recrear entornos inmersivos de alta fidelidad psicológica, concebidos específicamente para el fortalecimiento de la autorregulación emocional, la desescalada de conflictos y la resiliencia del profesorado ante incidentes críticos de aula. De manera complementaria, se formula el Modelo SEED (Socio-Emotional Educator Development Model), una propuesta teórica y metodológica original que traduce dicha infraestructura técnica en una secuencia pedagógica progresiva y replicable, orientada a la futura validación empírica en programas de formación docente.

Para lograr este cometido, el capítulo se articula en torno a la convergencia entre la computación afectiva, la analítica multimodal del aprendizaje (Multimodal Learning Analytics, MMLA) y el diseño instruccional inmersivo. A través de este marco, se profundiza en la articulación de requerimientos del sistema, la estructuración de arquitecturas por capas, que integran motores afectivos, sensores fisiológicos y agentes conversacionales basados en modelos de lenguaje de gran escala (LLM), y el establecimiento de salvaguardas éticas y de seguridad psicológica. Con ello, se busca ofrecer una hoja de ruta conceptual que guíe la construcción de simuladores avanzados de entrenamiento socioemocional en el contexto educativo.

1.1. DE LA PLATAFORMA INMERSIVA GENÉRICA AL SISTEMA ESPECIALIZADO EN APRENDIZAJE SOCIOEMOCIONAL

Las plataformas comerciales de mundo virtual y metaverso (p. ej., VRChat, Roblox, AltspaceVR u Horizon Workrooms) han sido concebidas fundamentalmente para el entretenimiento masivo, el aprendizaje declarativo no estructurado o la colaboración remota general. Su adscripción a la formación docente avanzada en competencias socioemocionales evidencia algunas limitaciones pues carecen de mecanismos para la simulación de estados afectivos en avatares, no ofrecen conectividad ~~síncrona~~ con sensores fisiológicos de grado médico y no garantizan el cumplimiento de estándares de seguridad de la información relacionada con datos psicofisiológicos.

La literatura especializada en formación docente mediante tecnologías inmersivas y digitales ha experimentado un crecimiento sostenido en el último quinquenio (Sáez-Delgado et al., 2025). Revisiones sistemáticas y estudios recientes confirman que la inmersión, la interactividad y la repetibilidad son ventajas centrales de la RV frente a la formación tradicional (Docter et al., 2024; Li et al., 2024; Zhang et al., 2024). Asimismo, se ha evidenciado el rol clave del aprendizaje socioemocional y la autorregulación en la salud mental y el bienestar profesional del profesorado (Collie et al., 2025; Correa-Gutiérrez et al., 2026; Lozano-Peña et al., 2021, 2022), especialmente

al enfrentar la carga emocional de la docencia, los incidentes críticos de aula o las transiciones complejas (Baeza-Sepúlveda et al., 2026; Ojeda-Rodríguez et al., 2026; Sáez-Delgado, Medina, et al., 2024). En este contexto, la integración de mundos virtuales y tecnologías digitales ha demostrado un impacto positivo en las competencias didácticas y socioemocionales docentes (Rojas-García et al., 2022; Sáez-Delgado et al., 2026; Sáez-Delgado, Coronado-Sánchez, et al., 2025), permitiendo además evaluar la calidad de las plataformas inmersivas mediante estándares internacionales como el ISO/IEC 25010 (Sáez-Delgado, Mella-Norambuena, Coronado, et al., 2026). Por ende, prototipos recientes que integran RV con agentes de inteligencia artificial muestran que ya existe una base tecnológica e instruccional madura para fundamentar el desarrollo de un SMV-ESD (Docter et al., 2024; Li et al., 2024).

El entrenamiento del profesorado ante incidentes críticos, sucesos disruptivos e imprevistos de alta carga emocional, requiere la ingeniería de un Sistema de Mundo Virtual para el Entrenamiento Socioemocional Docente (SMV-ESD). Este sistema se define como una arquitectura sintética regulada en la que los estímulos visuales, acústicos y relacionales son modulados en tiempo real por un motor afectivo híbrido que responde dinámicamente a la conducta verbal, corporal y neurofisiológica del docente. A diferencia de los simuladores de gestión de aula orientados a la instrucción (Mouw et al., 2024), el foco del SMV-ESD es explícitamente la regulación emocional del propio docente como variable dependiente central, no únicamente el desempeño pedagógico observable.

1.2. PRINCIPIOS DE DISEÑO TECNOPEDAGÓGICO CENTRADOS EN LA REGULACIÓN AFECTIVA DOCENTE

La conceptualización e ingeniería de un SMV-ESD debe cimentarse sobre cuatro principios tecnopedagógicos fundamentales:

- Presencia Encarnada Controlada (Embodiment): el docente debe habitar un avatar tridimensional que replique con fidelidad su propio esquema corporal y micro-expresiones, minimizando la carga cognitiva secundaria dedicada al control motor. La evidencia sobre diseño de RV inmersiva basado en principios de encarnación (embodied design) muestra que la congruencia entre el gesto físico y la retroalimentación virtual favorece la codificación motora y emocional del aprendizaje (Johnson-Glenberg, 2018).
- **Reactividad Socioemocional Emergente:** Las interacciones del entorno no deben articularse mediante guiones rígidos, sino emerger del análisis continuo de la prosodia, la intención semántica y el estado de activación neurovegetativa

del usuario. Los avances en agentes conversacionales e Inteligencia Artificial generativa y adaptativa han transformado la personalización del aprendizaje y la preparación docente, permitiendo superar mitos instruccionales tradicionales (Escobar-Casallas et al., 2026) y reflexionar sobre el rol del profesorado frente a la IA en aulas inteligentes y espacios educativos extendidos dentro de la Educación 4.0 (Arias et al., 2025; Barajas Motta et al., 2025; Chiappe et al., 2025; Quevedo Piratova et al., 2025). Asimismo, los modelos de lenguaje de gran escala (LLM) capaces de sostener diálogos de rol con coherencia de personalidad y adaptación contextual (Park et al., 2023; Shanahan et al., 2023) habilitan hoy una reactividad que hace apenas cinco años solo era alcanzable mediante guiones ramificados.

- Confinamiento y Cuidado del Estrés: la simulación debe estructurar "andamiajes emocionales" que permitan inducir un estrés fisiológico formacional, evitando la saturación cognitiva, la descompensación afectiva o el trauma vicario. Este principio recoge la lógica del entrenamiento de inoculación de estrés (stress inoculation training) apoyado por RV adaptativa, en el que la intensidad del estresor se dosifica en función de la respuesta fisiológica del usuario (Kluge et al., 2021).
- Retroalimentación Objetiva Basada en Evidencia Multimodal: la arquitectura debe registrar, procesar y visibilizar las variables fisiológicas invisibles (HRV, GSR, fijación ocular), transformándolas en insumos metacognitivos durante la fase de debriefing, en línea con los marcos de analítica multimodal del aprendizaje (Giannakos et al., 2022).

Estos cuatro principios dialogan directamente con el Modelo Cognitivo-Afectivo del Aprendizaje Inmersivo (CAMIL), que explica cómo las affordances específicas de la RV, agencia, encarnación e interactividad, inciden en resultados psicológicos y de aprendizaje a través de mediadores como la presencia y la carga cognitiva (Makransky & Petersen, 2021). El SMV-ESD puede leerse como una especialización socioemocional de dicho modelo general, en la que la variable de salida no es únicamente la adquisición de conocimiento declarativo, sino la autorregulación emocional bajo presión.

2. MODELO DE REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Considerando la oportunidad de coadyuvar al mejoramiento de las condiciones socioemocionales del profesorado frente a los incidentes críticos de aula, se presentan a continuación los requerimientos del sistema, organizados en cuatro niveles que parten

de las necesidades que motivan el proyecto y que, en consonancia con ellas, identifican lo que necesitan los docentes y científicos que usarán el sistema.

Desde este nivel, se definen las condiciones que el sistema debe cumplir y las capacidades que debe poseer. Finalmente, se derivan los requisitos funcionales y no funcionales de un sistema informático que cumpla, de manera integral, con el modelo.

Los dos primeros niveles fueron levantados en talleres con formadores de docentes y especialistas en computación afectiva, según se detalla en el apartado 5.5.

Tabla 1. Requisitos de alto nivel (RAN).

Código	Requisito de alto nivel
RAN-01	Reducir el desgaste emocional y la tasa de abandono del profesorado asociados a incidentes críticos de aula
RAN-02	Fortalecer la capacidad de autorregulación emocional del profesorado ante situaciones de alta exigencia en el aula
RAN-03	Proteger la integridad psicológica del profesorado durante su proceso de formación y desarrollo profesional
RAN-04	Garantizar la viabilidad institucional y la continuidad del programa de formación docente en el tiempo, de modo que la inversión de las facultades de educación se traduzca en uso sostenido a mediano y largo plazo
RAN-05	Proteger la privacidad y los datos personales del profesorado, y asegurar el cumplimiento normativo de las facultades de educación en el manejo de esa información

A partir de cada requerimiento de alto nivel, los talleres de elicitación permitieron identificar necesidades más concretas, expresadas desde la perspectiva de quienes usarán el sistema o se beneficiarán directamente de él (Tabla 2).

Tabla 2. Requisitos de partes interesadas.

Código	Alineada con	Requisito de parte interesada
RPI-01	RAN-01	El formador necesita escenarios de incidentes críticos configurables y repetibles
RPI-02	RAN-01	El docente necesita practicar sin que los errores tengan consecuencia real sobre su evaluación o su aula
RPI-03	RAN-01	El docente necesita que la reacción del estudiante virtual sea creíble para que la práctica transfiera a la realidad
RPI-04	RAN-02	El docente necesita reconocer su propia activación emocional durante el incidente para poder regularla
RPI-05	RAN-02	El docente necesita revisar su propia respuesta emocional después del incidente para fortalecer su autorregulación en sesiones futuras

Código	Alineada con	Requisito de parte interesada
RPI-06	RAN-02	Los especialistas en computación afectiva necesitan verificar la progresión de la autorregulación del docente entre sesiones
RPI-07	RAN-03	El docente necesita poder interrumpir la simulación por su propia decisión en cualquier momento
RPI-08	RAN-03	El sistema necesita detectar señales de descompensación antes de que el docente las reporte
RPI-09	RAN-03	El docente necesita que la dificultad del escenario responda a su carga cognitiva real y no a un guion fijo
RPI-10	RAN-04	Los especialistas en computación afectiva necesitan que el uso del sistema no genere rechazo por malestar físico asociado al dispositivo, para sostener el programa en el tiempo
RPI-11	RAN-04	Los especialistas en computación afectiva necesitan que la interacción con el agente virtual mantenga naturalidad suficiente para no desincentivar el uso continuado
RPI-12	RAN-04	Los especialistas en computación afectiva necesitan que las sesiones prolongadas no produzcan fatiga que reduzca la frecuencia de uso del programa
RPI-13	RAN-05	El docente necesita que sus datos biométricos no puedan usarse con fines punitivos ni de vigilancia
RPI-14	RAN-05	Los especialistas en computación afectiva necesitan que el manejo de los datos del profesorado cumpla con la normativa de protección de datos vigente
RPI-15	RAN-05	Los especialistas en computación afectiva necesitan que los datos del profesorado permanezcan protegidos incluso al integrarse con otros sistemas institucionales
RPI-16	RAN-02.	El docente necesita habitar un avatar que replique con fidelidad su esquema corporal y sus micro-expresiones, para favorecer la codificación motora y emocional del aprendizaje.

Cada requerimiento de partes interesadas se traduce en una o varias condiciones que el sistema debe cumplir o en una o varias capacidades que debe poseer (ver Tabla 3).

Tabla 3. Requisitos de sistema.

Código	Alineada con	Requisito de sistema
RS-01	RPI-01	El sistema debe permitir la inyección paramétrica y dinámica de eventos disruptivos
RS-02	RPI-02	El sistema debe aislar cada sesión y permitir su reinicio sin arrastrar estado de sesiones previas

Código	Alineada con	Requisito de sistema
RS-03	RPI-03	El sistema debe adaptar tono, postura y expresión facial del agente según la intencionalidad del docente
RS-04	RPI-04	El sistema debe capturar señales fisiológicas relevantes para inferir el estado emocional del docente durante la sesión
RS-05	RPI-05	El sistema debe permitir al docente revisar su propia respuesta fisiológica después del incidente
RS-06	RPI-06	El sistema debe registrar la información de las sesiones en un formato que permita su reutilización por otras plataformas
RS-07	RPI-07	El sistema debe permitir al docente interrumpir la simulación de forma inmediata y por su propia decisión
RS-08	RPI-08	El sistema debe monitorear continuamente la conductancia electrodérmica y atenuar la hostilidad del PNJ (Personaje No Jugador) ante desviaciones sostenidas
RS-09	RPI-09	El sistema debe estimar la carga cognitiva del docente en tiempo real
RS-10	RPI-10	El sistema debe mantener la latencia motion-to-photon por debajo del umbral de detección humana
RS-11	RPI-11	El sistema debe mantener la latencia vocal de IA por debajo del umbral de plausibilidad conversacional
RS-12	RPI-12	El sistema debe sostener una tasa de refresco que evite fatiga visual durante activación simpática
RS-13	RPI-13	El sistema debe impedir que la identidad del docente se asocie con sus métricas fisiológicas
RS-14	RPI-14	El sistema debe someter a los agentes conversacionales a auditoría algorítmica continua de sus patrones de conducta
RS-15	RPI-1	El sistema debe representar el cuerpo y los movimientos del docente con fidelidad suficiente para sostener esa codificación durante la simulación.

Los requerimientos anteriores se satisfacen mediante uno o más componentes de software concretos. Es en este nivel donde aparecen las tecnologías, los algoritmos y los estándares específicos que hacen posible la capacidad descrita en el nivel anterior. La tabla 4 presenta primero los requerimientos funcionales y luego los no funcionales, cada uno alineado con el requerimiento de sistema del que proviene.

Tabla 4. Requisitos de software funcionales y no funcionales.

Código	Alineada con	Requisito de software
RF-01	RS-01	El sistema debe permitir la inyección paramétrica y dinámica de eventos disruptivos de aula, tales como conflictos interpersonales, desafíos a la autoridad o descompensación afectiva estudiantil
RF-02	RS-03	El sistema debe adaptar el tono, la postura y la expresión facial del agente conversacional según la intencionalidad detectada en el docente

Código	Alineada con	Requisito de software
RF-03	RS-04	El sistema debe capturar de forma síncrona señales de HRV, GSR y eye-tracking mediante visores HMD o dispositivos wearables
RF-04	RS-05	El sistema debe permitir al docente revisar, mediante repetición inmersiva 360°, la sincronización entre los hitos de la simulación y sus propias curvas de estrés fisiológico
RF-05	RS-07	El sistema debe reconocer un gesto físico o comando predeterminado y, al detectarlo, abortar o pausar de inmediato la simulación
RF-06	RS-09	El sistema debe estimar de forma continua la carga cognitiva del docente mediante pupilometría y patrones de fijación ocular
RF-07	RS-08	El sistema debe detectar desviaciones sostenidas de la conductancia electrodérmica del docente respecto de su línea basal y atenuar automáticamente la hostilidad del agente PNJ ante dichas desviaciones
RF-08	RS-02	El sistema debe mantener y actualizar el modelo de estado del aula virtual y coordinar la conducta de los avatares a lo largo de la sesión
RF-09	RS-03	El sistema debe interpretar el contenido verbal del docente para orientar la respuesta del agente conversacional
RF-10	RS-03	El sistema debe interpretar el tono y la entonación de la voz del docente como señal de intención emocional
RF-11	RS-03	El sistema debe calcular el estado emocional del agente a partir de una estructura cognitiva de emociones
RF-12	RS-03	El sistema debe representar el estado emocional del agente en un espacio dimensional de placer, activación y dominancia
RF-13	RS-16	El sistema debe representar gráficamente en tres dimensiones el entorno del aula virtual y el cuerpo del docente
RF-14	RS-16	El sistema debe modelar el esquema corporal del docente sobre el avatar que lo representa
RF-15	RS-16	El sistema debe mapear el movimiento corporal del docente sobre el avatar mediante cinemática inversa de cuerpo completo
RF-16	RS-16	El sistema debe capturar el movimiento físico del docente para alimentar la cinemática del avatar en tiempo real
RF-17	RS-16	El sistema debe espacializar el audio del entorno para permitir la localización auditiva de eventos del aula
RF-18	RS-16	El sistema debe proporcionar retroalimentación táctil que refuerce la sensación de presencia corporal del docente
RNF-01	RS-10	El desfase entre el movimiento físico del docente y el refresco de pantalla no debe ser percibido como molesto por al menos el noventa por ciento de una muestra representativa de docentes, evaluada mediante prueba de usuario
RNF-02	RS-11	El tiempo de respuesta del PNJ no debe ser percibido como una interrupción antinatural de la conversación por al menos el noventa por ciento de una muestra representativa de docentes, evaluada mediante prueba de usuario

Código	Alineada con	Requisito de software
RNF-03	RS-12	El renderizado no debe producir fatiga ocular reportada por más del diez por ciento de una muestra representativa de docentes tras una sesión de duración estándar
RNF-04	RS-13	Las señales fisiológicas del docente deben cifrarse tanto en tránsito como en reposo mediante un algoritmo de cifrado simétrico de grado industrial vigente, verificable mediante auditoría independiente que confirme la ausencia de vulnerabilidades conocidas
RNF-05	RS-06	El sistema debe registrar de forma estandarizada los eventos de la simulación y las métricas fisiológicas en un formato interoperable con Learning Record Stores
RNF-06	RS-02	Cada sesión debe ejecutarse de forma independiente y debe poder reiniciarse sin arrastrar estado de sesiones previas
RNF-07	RS-14	Los patrones conductuales de los agentes PNJ deben auditarse cada cierto número de sesiones acumuladas, comparando la distribución de sus respuestas frente a docentes de distintos grupos demográficos. Cualquier diferencia que supere el margen de tolerancia definido por el panel revisor debe generar un reentrenamiento del agente antes de su siguiente uso
RNF-09	RS-04	Los artefactos de movimiento deben eliminarse de la señal fisiológica antes de su análisis, y la sincronización entre las curvas fisiológicas y los eventos de la simulación no debe exceder un margen de diez milisegundos
RNF-10	RS-13	Los identificadores directos del docente deben sustituirse por seudónimos no reversibles sin clave

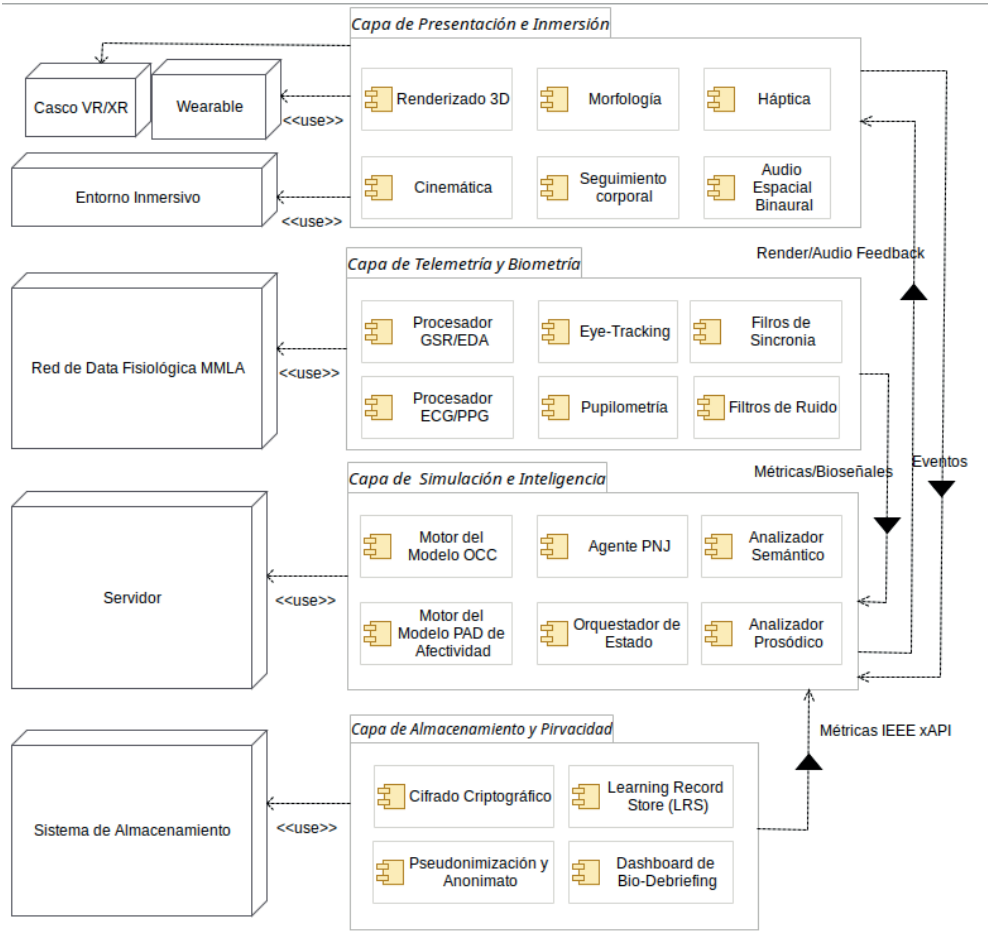
Este modelo de requerimientos se considera nuclear pero no definitivo pues en cualquier desarrollo de software los requisitos evolucionan a medida que avanza el proyecto, se incorporan nuevos hallazgos o cambian las condiciones institucionales que le dieron origen. Además, las sesiones de validación del model de requisitos consideraron los intereses particulares de cada grupo de participantes, y de ahí surgieron ajustes que se integraron a la redacción actual.

3. DESCRIPCIÓN DE LA ARQUITECTURA DEL SISTEMA: CAPAS, MÓDULOS Y FLUJO DE DATOS

La arquitectura del sistema adopta un patrón por capas ampliamente utilizado en sistemas de software distribuidos. Esta organización modular separa la experiencia sensorial del docente de la lógica de procesamiento interno, la captura biométrica y la persistencia de datos. Dicha separación facilita modificar o reemplazar cada módulo de forma independiente sin afectar a las demás capas y permite que equipos multidisciplinarios trabajen en paralelo.

En las siguientes subsecciones, cada capa se aborda estructuradamente: **primero desde su propósito funcional y su alineación con el modelo de requisitos**, y **posteriormente desde los componentes de *hardware, software* y flujo de datos que la concretan**.

Figura 1. Vista panorámica del sistema.



3.1. CAPA DE PRESENTACIÓN E INMERSIÓN

Propósito Funcional y Alineación con Requisitos

Esta capa constituye la interfaz directa con la que interactúa el docente. Su función principal es permitir que el profesor habite un avatar tridimensional que replique con fidelidad su esquema corporal y perciba el entorno virtual con suficiente coherencia sensorial para inducir presencia encarnada (*embodiment*). Con ello, responde a la necesidad de practicar en un entorno altamente creíble y representativo del aula real (RPI-

16, RS-16, RF-13, RF-14). Asimismo, la capa está diseñada para satisfacer las exigencias no funcionales de latencia y desempeño, previniendo malestares físicos o fatiga visual derivados del uso de dispositivos inmersivos (RNF-01, RNF-03).

Componentes Técnicos e Implementación

Para cumplir sus funciones, la capa integra dispositivos de *hardware* especializados y módulos de *software* dedicados:

- **Dispositivos de Entrada/Salida (*Hardware*):** Incluye cascos de realidad virtual o extendida (VR/XR) autónomos o conectados a PC (PCVR), que proyectan el entorno visual y capturan los movimientos de cabeza, manos y voz del docente. Se complementa con dispositivos vestibles (*wearables*) para el seguimiento corporal completo e interacciones táctiles. De forma opcional e institucional, puede integrarse con infraestructura física fija (cápsulas sensoriales, domos de proyección, salas de movimiento o pisos interactivos) que aportan estímulos de desplazamiento y vibración ambiental. No obstante, el sistema está diseñado para operar con los dispositivos portátiles básicos y garantizar la usabilidad aun ante la ausencia de infraestructura física.
- **Módulos de Software:**
    - *Renderizado 3D y Morfología:* Construyen el entorno sintético del aula y modelan la estructura corporal del avatar para asegurar una alta correspondencia visual con el usuario.
    - *Cinemática Inversa de Cuerpo Completo:* Traduce en tiempo real las señales de movimiento capturadas por el casco y los *wearables* hacia la postura del avatar (RF-15, RF-16).
    - *Audio Espacial Binaural y Háptica:* Espacializan el sonido ambiental para posibilitar la localización acústica de eventos (p. ej., un estudiante hablando desde la izquierda) y aportan retroalimentación táctil que refuerza la presencia corporal (RF-17, RF-18).

La capa no opera de forma aislada: recibe de la capa de simulación e inteligencia las instrucciones conductuales que deben representarse en el entorno y entrega a la capa de telemetría las señales de movimiento corporal para su procesamiento.

3.2. CAPA DE INTELIGENCIA Y SIMULACIÓN

Propósito Funcional y Alineación con Requisitos

Esta capa actúa como el núcleo de procesamiento adaptativo del sistema. Su objetivo es gestionar la dinámica del aula virtual y gobernar el comportamiento del

estudiante virtual (agente PNJ) con coherencia temporal y pedagógica sostenida, evitando reacciones erráticas o guiones preprogramados rígidos (RPI-01, RPI-03, RS-03, RF-01, RF-08). La capa analiza continuamente la conducta verbal, prosódica y neurovegetativa del docente para modular la hostilidad o contención del agente en tiempo real, garantizando la fidelidad psicológica del escenario.

Componentes Técnicos e Implementación

La capa se despliega en una infraestructura distribuida de servidores centrales y nodos de borde (*Edge Computing*), donde estos últimos reducen la latencia de respuesta acortando la brecha entre el habla del docente y el modelo de lenguaje. Integra los siguientes componentes:

- **Orquestador de Estado del Aula:** Mantiene la memoria compartida de la sesión y coordina la consistencia de las acciones del entorno entre instantes sucesivos (RF-08).
- **Agente PNJ Conversacional:** Ejecuta el comportamiento afectivo adaptativo del estudiante virtual en postura, tono y expresión facial.
- **Analizadores de Entrada (Semántico y Prosódico):** El *analizador semántico* interpreta el contenido verbal del docente (RF-09), mientras que el *analizador prosódico* procesa el tono y la entonación vocal para anticipar cambios emocionales antes de su confirmación verbal (RF-10).
- **Motores Afectivos Híbridos (OCC y PAD):** El *motor del modelo OCC* evalúa la situación y la clasifica en una categoría emocional discreta mediante una estructura cognitiva (Ortony et al., 1988; RF-11). Por su parte, el *motor del modelo PAD* traduce dicha categoría a un espacio dimensional de placer, activación y dominancia (RF-12), matizando la intensidad de la respuesta del agente de acuerdo con principios explícitos y auditables (Louie et al., 2024; Shanahan et al., 2023).

Respecto al flujo de datos, esta capa consume de la capa de telemetría las métricas fisiológicas y de carga cognitiva para decidir cuándo intensificar o atenuar el conflicto, y envía a la capa de presentación las instrucciones de renderizado del avatar estudiantil.

3.3. CAPA DE TELEMETRÍA MULTIMODAL Y SENSADO

Propósito Funcional y Alineación con Requisitos

Esta capa responde a las necesidades de monitoreo objetivo y regulación de la activación fisiológica del docente durante la simulación (RPI-04, RPI-08, RPI-09, RS-

04, RS-08, RS-09, RF-03). Su función dentro del marco de la Analítica Multimodal del Aprendizaje (MMLA) es capturar, limpiar y sincronizar señales biológicas y conductuales en tiempo real. Esta evidencia permite al sistema estimar la carga cognitiva, detectar signos tempranos de distrés y activar salvaguardas de atenuación de conflicto antes de que se produzca una descompensación afectiva.

Componentes Técnicos e Implementación

La capa conforma una red MMLA alimentada por los sensores integrados en los *wearables* y el casco:

- **Procesadores de Señal Biológica:**
    - *Procesador GSR/EDA:* Mide la actividad electrodérmica como indicador de activación simpática y señal temprana de estrés.
    - *Procesador ECG/PPG:* Registra la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV) para evaluar el tono vagal y la capacidad de autorregulación fisiológica.
    - *Componente de Eye-Tracking y Pupilometría:* Captura el movimiento ocular, patrones de fijación y variaciones pupilares para estimar la carga cognitiva en tiempo real (RF-06).
- **Módulos de Post-Procesamiento:**
    - *Filtros de Ruido:* Eliminan artefactos de movimiento que de otro modo distorsionarían las lecturas de activación fisiológica (RNF-09).
    - *Filtros de Sincronía:* Alinean mediante estampado de tiempo de alta resolución (< 10 ms) cada pico fisiológico con el evento del aula virtual que lo desencadenó (RNF-09).

Los datos procesados se sirven simultáneamente a la capa de simulación e inteligencia (para alimentar los bucles adaptativos) y a la capa de almacenamiento (para su conservación analítica).

3.4. CAPA DE ALMACENAMIENTO, ANALÍTICA Y PRIVACIDAD

Propósito Funcional y Alineación con Requisitos

Su propósito fundamental es resguardar la persistencia, confidencialidad e integridad de la información generada durante las sesiones de simulación, dando cumplimiento estricto a las exigencias éticas y de gobernanza de datos sensibles (RPI-05, RPI-13, RPI-14, RS-06, RS-13, RNF-04, RNF-05, RNF-10). Asimismo, esta capa proporciona la infraestructura requerida para el *debriefing* reflexivo del docente y la integración interoperable con los sistemas de gestión del aprendizaje institucionales.

Componentes Técnicos e Implementación

Esta capa gestiona los datos de sesión mediante cuatro componentes de *software*:

- **Learning Record Store (LRS):** Almacena las trazas de interacción y métricas fisiológicas bajo estándares e perfiles de interoperabilidad (IEEE xAPI), asegurando que los datos se puedan exportar o integrar con plataformas LMS (Giannakos et al., 2022; RNF-05).
- **Cifrado Criptográfico:** Protege las señales fisiológicas y registros tanto en tránsito como en reposo mediante algoritmos de cifrado simétrico de grado industrial (RNF-04).
- **Modulo de Pseudonimización y Anonimato:** Sustituye los identificadores directos del profesor por seudónimos no reversibles sin clave, impidiendo la vinculación punitiva o no autorizada entre la identidad del docente y sus métricas fisiológicas (RS-13, RNF-10).
- **Dashboard de Bio-Debriefing:** Recupera las curvas de activación fisiológica de la sesión y las presenta sincronizadas con la repetición inmersiva en 360° (RF-04). Esto permite al docente realizar una revisión metacognitiva de su respuesta bajo presión, cerrando el ciclo de aprendizaje diseñado desde la capa de telemetría.

4. CONSIDERACIONES ESPECÍFICAS DE DISEÑO TECNOPEDAGÓGICO E INTERACCIÓN

4.1. CONFIGURACIÓN DE ESCENARIOS PARA EL ENTRENAMIENTO EN ESCENARIOS CRÍTICOS (MODELO A.S.E.C.)

La parametrización del entorno virtual debe responder a modelos instruccionales probados para la gestión de crisis, tales como el Modelo A.S.E.C. (Aprendizaje Socioemocional para Escenarios Críticos). El sistema configura los escenarios en tres fases algorítmicas interconectadas:

- 1. Fase de Gatillamiento (Triggering Phase): el motor inyecta un incidente crítico de aula (p. ej., un desafío directo a la autoridad o un conflicto inter-pares) para inducir un pico de activación simpática (incremento fásico de GSR).
- 2. Fase de Inflexión y Regulación (Regulative Phase): el sistema monitorea la respuesta del docente. Si el análisis de voz muestra prosodia regulada y las métricas de HRV reflejan mantenimiento del tono vagal, el PNJ reduce gradualmente la agresión, en un esquema de retroalimentación cerrada

análogo a los sistemas de RV adaptativa por biorretroalimentación descritos en el ámbito clínico (Moldoveanu et al., 2023).

- 3. Fase de Re-estabilización y Cierre (Resolution Phase): el escenario permite al docente aplicar contención verbal y alcanzar un acuerdo pedagógico con el avatar estudiantil, cerrando el bucle fisiológico del estrés.

Este esquema de tres fases es compatible con la lógica del entrenamiento de inoculación de estrés apoyado en RV con dosificación fisiológica del estresor, en el que la intensidad del desafío se ajusta progresivamente en función de la respuesta autonómica del usuario, evitando tanto la habituación por subestimulación como la saturación por sobreestimulación (Kluge et al., 2021).

4.2. FIDELIDAD FÍSICA VS. FIDELIDAD PSICOLÓGICA (PSYCHOLOGICAL FIDELITY)

Un principio crítico en la ingeniería de este sistema es la clara diferenciación entre la fidelidad gráfica (fotorrealismo) y la fidelidad psicológica (capacidad de inducir estados afectivos reales). La investigación demuestra que la fidelidad física desmedida consume recursos computacionales críticos sin necesariamente incrementar el valor pedagógico. En contraste, la fidelidad psicológica se logra priorizando el realismo en las dinámicas sociales, la coherencia conversacional del PNJ y la reactividad afectiva del entorno ante el comportamiento del profesor, en línea con lo que el modelo CAMIL predice respecto a la relación entre affordances de la RV y mediadores psicológicos como la presencia (Makransky & Petersen, 2021), y con la evidencia de que el diseño encarnado, más que el detalle gráfico, es lo que sostiene la codificación afectiva del aprendizaje (Johnson-Glenberg, 2018).

4.3. PROTOCOLOS DE SEGURIDAD PSICOLÓGICA EN EL SISTEMA: MECANISMOS DE SAFETY STOPS

Dado que el entrenamiento enfrenta al docente a situaciones estresantes, la arquitectura integra salvaguardas computacionales activas:

- Monitor de Pánico Biométrico: si la conductancia electrodérmica (GSR) del docente supera las 3 desviaciones estándar respecto de su línea basal durante más de 15 segundos sostenidos, el sistema atenúa automáticamente la hostilidad del PNJ.
- Botón de Desconexión / Gesto de Seguridad (Safety Stop): el docente puede ejecutar un gesto físico predeterminado (cruzar los brazos) para pausar inmediatamente la simulación y ser redirigido a un espacio neutro de descompresión.

La literatura reciente sobre biorretroalimentación en RV aporta un matiz importante para el diseño de estos mecanismos: informar explícitamente al usuario de que tiene control sobre variables del entorno reduce por sí mismo los niveles de activación electrodérmica, incluso antes de que dicho control se ejercite (Sehrt et al., 2024). Esto sugiere que el Safety Stop no debería diseñarse únicamente como una salida de emergencia, sino como un recordatorio visible y permanente de agencia, lo que podría moderar la intensidad del estrés percibido a lo largo de toda la sesión. Al mismo tiempo, evidencia proveniente de estudios de regulación biofeedback bajo estrés advierte que la autopercepción subjetiva de distrés no siempre coincide con los indicadores fisiológicos objetivos (Daniel-Watanabe et al., 2024), lo que refuerza la necesidad de que el Monitor de Pánico Biométrico combine umbrales fisiológicos con checkpoints de autorreporte breve, en lugar de depender de una sola fuente de evidencia.

4.4. PROPUESTA ORIGINAL: EL MODELO SEED (SOCIO-EMOTIONAL EDUCATOR DEVELOPMENT MODEL)

Los apartados anteriores especifican una arquitectura técnica capaz de sostener escenarios afectivamente reactivos. Sin embargo, la literatura sobre formación docente en RV muestra que el desarrollo de competencias socioemocionales complejas —tales como la autorregulación, la resiliencia y la empatía ante situaciones de alta exigencia— no es un evento de una sola sesión, sino un proceso continuo que requiere modelos teóricos sólidos, instrumentos psicométricamente validados y guías estructuradas de entrenamiento (Jara-Coatt, Constenla-Núñez, et al., 2025; Jara-Coatt, Sáez-Delgado, et al., 2026; Mouw et al., 2024; Sáez-Delgado, Mella-Norambuena, & López-Angulo, 2024). Investigaciones recientes respaldan la importancia de los programas de intervención y modelos de competencia socioemocional docente para promover aulas prósperas e innovadoras (Lozano-Peña et al., 2023; Sáez-Delgado, Jara-Coatt, et al., 2026). A partir de esta constatación y en alineación con guías de entrenamiento socioemocional previamente consolidadas como el programa ESED-10 (Lozano Peña et al., 2024), se propone en este capítulo un modelo original de desarrollo psicoemocional pensado específicamente para estructurar simulaciones progresivas en mundo virtual: el Modelo SEED (Socio-Emotional Educator Development Model).

El nombre y la sigla SEED (semilla, en inglés) se eligen deliberadamente como metáfora del desarrollo: cada sesión de simulación no pretende “resolver” la competencia socioemocional del docente en un único ensayo, sino sembrar y cultivar progresivamente

su capacidad de autorregulación bajo presión, a través de un ciclo de cuatro fases que se repite y se intensifica a lo largo de un programa de entrenamiento. Las cuatro fases del modelo, que dan literalmente origen a la sigla, son las siguientes:

S: Sensitización (Sensitization)

Fase de calibración fisiológica y psicoeducativa previa a la exposición. El sistema registra la línea basal individual de HRV y GSR del docente en condiciones de reposo y le introduce, mediante un breve módulo psicoeducativo, los conceptos de activación neurovegetativa y regulación emocional que empleará durante la sesión. Esta fase opera como control experimental interno (línea base) y como andamiaje cognitivo previo, coherente con la recomendación de que los sistemas de biorretroalimentación en RV expliciten al usuario su capacidad de control sobre el entorno antes de la exposición al estresor (Sehrt et al., 2024).

E: Exposición (Exposure)

Fase de exposición graduada a un incidente crítico de baja-media intensidad (equivalente a la Fase de Gatillamiento del Modelo A.S.E.C., apartado 4.1), con dosificación algorítmica del estresor basada en la respuesta fisiológica del docente, siguiendo la lógica de plataformas de entrenamiento de inoculación de estrés apoyadas en RV (Kluge et al., 2021).

E: Escalamiento regulado (Escalation)

Fase de incremento progresivo de la intensidad del conflicto, condicionado al mantenimiento de indicadores de regulación (tono vagal estable, prosodia contenida). Si el docente muestra signos de desregulación sostenida, el motor afectivo reduce la hostilidad del PNJ en un bucle cerrado de biorretroalimentación (Moldoveanu et al., 2023), y el Monitor de Pánico Biométrico y el Safety Stop descritos en 4.3 permanecen activos como salvaguarda en todo momento.

D: Debriefing y consolidación durable (Debriefing & Durability)

Fase de repetición inmersiva 360° con visualización sincronizada de las curvas fisiológicas propias (módulo RF-04), en la que el docente reinterpreta metacognitivamente su propia respuesta, y en la que se registra, mediante trazas xAPI, el grado de transferencia esperada a la práctica real de aula, permitiendo comparar el desarrollo entre sesiones sucesivas.

A diferencia del Modelo A.S.E.C., que describe la estructura interna de una sesión de simulación, el Modelo SEED opera en un nivel superior: describe cómo se articulan varias sesiones (cada una internamente estructurada según A.S.E.C.) a lo largo de un

programa de entrenamiento, incorporando una lógica de andamiaje decreciente (fading scaffolding) inspirada en la Zona de Desarrollo Próximo socioemocional, en la que la intensidad de la asistencia regulatoria del sistema disminuye a medida que el docente consolida su autorregulación en sesiones sucesivas.

Tabla 5. Descripción de las fases del modelo de intervención y sus componentes psicoeducativos y de apoyo adaptativo.

Fase	Objetivo psicoeducativo	Indicador fisiológico/ conductual	Grado de andamiaje del sistema
S: Sensitización	Calibración basal y activación de esquemas cognitivos de regulación	HRV y GSR basales; autorreporte breve pre-sesión	Alto (psicoeducación explícita)
E: Exposición	Reconocimiento temprano de la propia activación ante un estresor de baja-media intensidad	Incremento fásico de GSR; latencia de respuesta verbal	Alto (dosificación algorítmica conservadora)
E: Escalamiento	Sostenimiento de la regulación bajo incremento progresivo de la demanda	Tono vagal (HRV); prosodia; fijación ocular (carga cognitiva)	Decreciente entre sesiones (fading)
D: Debriefing	Consolidación metacognitiva y proyección a la práctica real	Autopercepción vs. curva fisiológica objetiva; trazas xAPI de transferencia	Bajo (reflexión guiada, no directiva)

Como todo modelo de desarrollo, el Modelo SEED formula implícitamente hipótesis contrastables que constituyen la base de una futura agenda de investigación empírica (desarrollada en el apartado 5.5): (a) la exposición repetida y dosificada según el ciclo SEED produce una reducción progresiva de la reactividad electrodérmica ante incidentes de intensidad equivalente entre sesiones sucesivas; (b) el andamiaje decreciente entre sesiones se asocia con un incremento de la autoeficacia regulatoria autopercibida, en línea con hallazgos sobre programas de regulación emocional para docentes en formación (Aldrup et al., 2024); y (c) la discrepancia entre autopercepción de distrés y evidencia fisiológica objetiva, documentada en biorretroalimentación bajo estrés (Daniel-Watanabe et al., 2024), disminuye a medida que el docente avanza en el ciclo SEED, lo que operacionalizaría el desarrollo de conciencia interoceptiva como variable de resultado adicional.

5. DISCUSIÓN Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

5.1. CUELLOS DE BOTELLA TECNOLÓGICOS Y OPTIMIZACIÓN DE LATENCIA VOCAL SUB-SEGUNDO

El principal desafío técnico en la implementación de SMV-ESD radica en la latencia acumulada de la cadena de procesamiento de IA. Una interacción conversacional fluida exige un tiempo inter-turnos inferior a 800 ms. El pipeline convencional, que abarca Speech-to-Text, inferencia en el LLM, motor de emociones OCC, Text-to-Speech afectivo y generación de blendshapes, en entornos nube tradicionales supera frecuentemente los 2.5 segundos, destruyendo la ilusión de plausibilidad.

Para resolver este cuello de botella, la arquitectura moderna debe implementar servidores de borde (Edge LLMs) optimizados mediante cuantización y ejecutar respuestas kinésicas intermedias: mientras el modelo de lenguaje procesa el texto de la respuesta, el avatar ejecuta de inmediato una micro-expresión facial o reorientación corporal no verbal basada en el análisis acústico de la voz del docente, rellenando la brecha temporal sin romper la inmersión. La detección continua de carga cognitiva mediante eye-tracking (Nasri et al., 2024) puede, además, emplearse como señal auxiliar para decidir en qué momento conviene introducir estas respuestas intermedias sin saturar al usuario.

5.2. DESAFÍOS ÉTICOS, GOBERNANZA DE DATOS PSICOFISIOLÓGICOS Y SESGOS ALGORÍTMICOS

La recopilación continua de señales biométricas (GSR, HRV, fijación ocular) genera perfiles psicofisiológicos de alta sensibilidad que revelan la vulnerabilidad emocional, la estabilidad psicológica y los sesgos implícitos del docente. Existe un riesgo severo si estas métricas son empleadas por administraciones educativas con fines punitivos, evaluativos o de contratación.

Asimismo, los LLM que nutren a los avatares estudiantiles corren el riesgo de amplificar sesgos raciales, de género o de clase presentes en sus datos de entrenamiento. La literatura sobre agentes de rol basados en LLM advierte, además, sobre el riesgo de que estos agentes desarrollen patrones conductuales no intencionados o difíciles de auditar cuando se les asignan objetivos y personalidades complejas sin restricciones explícitas (Shanahan et al., 2023), y propone que los principios de comportamiento de un agente simulado sean elicitados y validados por expertos de dominio antes de su despliegue (Louie et al., 2024). Es imperativo someter a los agentes PNJ del SMV-ESD a auditorías

algorítmicas continuas y restringir su espacio de estados mediante restricciones de seguridad socioeducativa equivalentes.

5.3. INTEROPERABILIDAD, ESTANDARIZACIÓN (IEEE XAPI) Y SOSTENIBILIDAD TÉCNICA

Para garantizar que los SMV-ESD sean adoptados masivamente por facultades de educación y centros de formación docente, los datos generados no pueden quedar atrapados en silos propietarios. Se requiere la adopción de perfiles xAPI para analítica inmersiva y multimodal, permitiendo que las métricas de entrenamiento socioemocional se integren de manera transparente con los Sistemas de Gestión del Aprendizaje (LMS) institucionales, en línea con los marcos de analítica multimodal del aprendizaje que enfatizan la necesidad de estandarización para la comparabilidad entre plataformas y estudios (Giannakos et al., 2022).

5.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN: VR ADAPTATIVA DE BUCLE CERRADO Y ECOSISTEMAS PHYGITAL

El desarrollo futuro de esta línea de investigación debe orientarse hacia tres fronteras tecnológicas clave:

- Sistemas de Realidad Virtual en Bucle Cerrado (Closed-Loop VR): algoritmos de inteligencia artificial que ajusten la dificultad pedagógica y la intensidad del conflicto en tiempo real basándose en la respuesta neurofisiológica directa del docente, extendiendo evidencia ya disponible en RV de biorretroalimentación bajo estrés en otros dominios (Daniel-Watanabe et al., 2024; Kluge et al., 2021).
- Agentes híbridos LLM-robótica social: la integración de plataformas robóticas sociales con LLM para el entrenamiento de habilidades relacionales, ya explorada en formación clínica (Borg et al., 2025), sugiere una posible extensión phygital del SMV-ESD hacia dispositivos físicos de práctica en contextos escolares reales.
- Ecosistemas “Phygital” de Formación Continua: la hibridación entre sensores portátiles discretos utilizados por el docente durante sus clases reales en la escuela física y sesiones de refuerzo sintético en el mundo virtual, creando un bucle de retroalimentación permanente entre la práctica analógica y la simulación digital.

5.5. AGENDA APLICADA: HACIA LA VALIDACIÓN EMPÍRICA DEL MODELO SEED

Este apartado sienta las bases metodológicas para un estudio empírico posterior y para un artículo científico derivado de este capítulo. Se propone un diseño piloto en tres etapas:

- Etapa 1: Validación de contenido y usabilidad. Panel de jueces expertos (formadores de docentes, especialistas en computación afectiva) que valide la correspondencia entre las cuatro fases del Modelo SEED y los indicadores fisiológicos/conductuales propuestos en la tabla del apartado 4.4, siguiendo procedimientos de validación de contenido ya empleados en el desarrollo de simuladores de gestión de aula (Docter et al., 2024).
- Etapa 2: Estudio piloto intrasujeto de dosis-respuesta. Aplicación del ciclo SEED completo a una cohorte reducida de docentes en formación a lo largo de 4 a 6 sesiones, con recolección continua de HRV, GSR y trazas xAPI, empleando instrumentos de evaluación multidimensional coherentes con los ya validados para el seguimiento longitudinal de competencias en RV (Mouw et al., 2024).
- Etapa 3: Comparación con evidencia de regulación emocional docente fuera de RV. Contraste de los resultados del ciclo SEED con la evidencia disponible sobre programas de regulación emocional y bienestar docente en formato no inmersivo (Aldrup et al., 2024; Xu et al., 2026), a fin de estimar el valor agregado específico de la simulación en mundo virtual frente a otras modalidades de intervención.

Este diseño de tres etapas, validación de contenido, piloto dosis-respuesta y comparación con literatura no inmersiva, constituye la base metodológica que se recomienda desarrollar en detalle (tamaño muestral, criterios de inclusión, comité de ética, instrumentos específicos de autorreporte) en un manuscrito de investigación independiente derivado de este capítulo.

6. CONCLUSIONES

El diseño e ingeniería de un sistema de mundo virtual para el entrenamiento socioemocional docente trasciende la mera creación de un entorno visual tridimensional. Representa la convergencia de la arquitectura de software distribuida, la computación afectiva, la analítica multimodal de datos biométricos y la pedagogía basada en evidencia.

Al estructurar plataformas que respeten la latencia crítica, garanticen la fidelidad psicológica, protejan la privacidad psicofisiológica del profesorado y apliquen

protocolos de debriefing biométrico, la comunidad educativa dispondrá de verdaderos laboratorios sintéticos donde los docentes podrán ensayar la autorregulación, superar la desestabilización de las crisis de aula y construir una práctica profesional próspera, resiliente y saludable.

El Modelo SEED aporta a esta arquitectura técnica una capa pedagógica de desarrollo progresivo, articulando en cuatro fases: Sensitización, Exposición, Escalamiento y Debriefing, la transición desde la calibración fisiológica inicial hasta la consolidación metacognitiva de la autorregulación emocional docente. Su formulación en este capítulo tiene un carácter deliberadamente fundacional: no se presenta como un modelo ya validado empíricamente, sino como una propuesta teórico-metodológica lista para ser sometida a un proceso de validación de contenido, pilotaje dosis-respuesta y contraste con la literatura de regulación emocional docente, tal como se detalla en el apartado 5.5. En ese sentido, este capítulo no cierra una línea de investigación, sino que abre explícitamente el camino hacia un futuro artículo científico centrado en la recolección de datos y la validación empírica del Modelo SEED.

7. AGRADECIMIENTOS

Al proyecto “Modelo Pedagógico y Prototipo Inicial en Metaverso para el Entrenamiento Socioemocional Docente: Avances hacia una Innovación Educativa Basada en Tecnología Inmersiva”, Nro.codigo: FGII04/2025. Fondo para el fortalecimiento de grupos de investigación y grupos de innovación, 2025. Financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile.

FONDECYT Regular Nº1241902, titulado: “Promoción de la prosperidad docente por medio de la intervención ProSEL-it basada en mundos virtuales con experiencias inmersivas y su efecto en las competencias socioemocionales, la resiliencia y el bienestar”, con una duración de 4 años (2024-2028), financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID). Y al Grupo consolidado de investigación denominado: “Research and Innovation Group in Socioemotional Learning, Well-Being and Mental Health to Foster Thriving” (THRIVE4ALL) UCSC.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS (APA 7.ª EDICIÓN)

Aldrup, K., Carstensen, B., & Klusmann, U. (2024). The role of teachers’ emotion regulation in teaching effectiveness: A systematic review integrating four lines of research. Educational Psychologist, 59(2), 89–110. https://doi.org/10.1080/00461520.2023.2282446

Appelhans, B. M., & Luecken, L. J. (2006). Heart rate variability as an index of regulated emotional responding. Review of General Psychology, 10(3), 229–240. https://doi.org/10.1037/1089-2680.10.3.229

Arias, J., Salas, J., Chiappe, A., & Sáez-Delgado, F. (2025). The Extended Education 4.0: Lifelong Learning in Times of Artificial Intelligence. Applied Sciences, 15(17), 9352. https://doi.org/10.3390/app15179352

Baeza-Sepúlveda, C., Sáez-Delgado, F., Jara-Coatt, P., Zañartu-Canihuante, N., & Brieba-Fuenzalida, J. (2026). Formación docente, competencias socioemocionales y género: implicancias para el bienestar y desgaste profesional. En Psicologia, comportamento humano e saúde mental 2. ISBN: 978-65-258-4254-7, pp. 1-16. Brasil. Editorial Atena. https://doi.org/10.22533/at.ed.547122611051

Barajas Motta, N., Chiappe, A., & Sáez-Delgado, F. (2025). Bridging the gap: AI and teacher training for inclusive Education 4.0. Journal of Research in Special Educational Needs. https://doi.org/10.1111/1471-3802.70033

Blascovich, J., Loomis, J., Beall, A. C., Swinth, K. R., Hoyt, C. L., & Bailenson, J. N. (2002). Immersive virtual environment technology as a methodological tool for social psychology. Psychological Inquiry, 13(2), 103–124. https://doi.org/10.1207/S15327965PLI1302_01

Borg, A., Georg, C., Jobs, B., Huss, V., Waldenlind, K., Ruiz, M., Skantze, G., & Parodis, I. (2025). Virtual patient simulations using social robotics combined with large language models for clinical reasoning training in medical education: Mixed methods study. Journal of Medical Internet Research, 27, e63312. https://www.jmir.org/2025/1/e63312

Chiappe, A., San Miguel, C., Sáez-Delgado, F. (2025). IA generativa versus profesores: reflexiones desde una revisión de la literature. Pixel-Bit: Revista de Medios y Educación. 72, 119-137. https://doi.org/10.12795/pixelbit.107046

Collie, R., Sáez-Delgado, F., Granziera, H. (2025). Teachers' Perceived Social-Emotional Competence as a Vital Mechanism of Adult SEL. In: Social and Emotional Learning: Research, Practice, and Policy. https://doi.org/10.1016/j.sel.2025.100117

Correa-Gutiérrez, P., Sáez-Delgado, F. & Jara Coatt, P. (2026). Hacia un ejercicio profesional próspero: el rol del aprendizaje socioemocional y el bienestar docente. 1° ed. – Curitiba, PR: Editora Artemis. https://editoraartemis.com.br/catalogo/ebook/hacia-un-ejercicio-profesional-prospero-el-rol-del-aprendizaje-socioemocional-y-el-bienestar-docente. ISBN: 978-65-81701-86-4. http://www.doi.org/10.37572/EdArt_230326864

Correa-Gutiérrez, P., Sáez-Delgado, F., & Jara-Coatt, P. (2026). Hacia un ejercicio profesional próspero: el rol del aprendizaje socioemocional y el bienestar docente. ISBN: 978-65-81701-86-4, pp. 1-181. Brasil. Editorial Artemis. https://doi.org/10.37572/EdArt_230326864

Daniel-Watanabe, L., et al. (2024). Using a virtual reality game to train biofeedback-based regulation under stress conditions. Psychophysiology, 61, e14705.

Docter, M. W., de Vries, T. N. D., Nguyen, H. D., & van Keulen, H. (2024). A proof-of-concept of an integrated VR and AI application to develop classroom management competencies in teachers in training. Education Sciences, 14(5), 540. https://doi.org/10.3390/educsci14050540

Escobar-Casallas, L., Chiappe, A., & Sáez-Delgado, F. (2026). From Learning-Style Neuromyths to AI-Enabled Personalisation for Teacher Preparation. Improving Schools, 1-26. https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.1177/13654802261432037

Giannakos, M., Sharma, K., Pappas, I. O., Kostakos, V., & Dougherty, E. (2022). Multimodal learning analytics. In Handbook of Learning Analytics. Society for Learning Analytics Research (SoLAR). https://doi.org/10.18608/hla22.012

Hughes, C. E., & Dieker, L. A. (2012). Simulators in teacher education. Proceedings of the 2012 ACM International Conference on Intelligent User Interfaces, 321–324. https://doi.org/10.1145/2166966.2167027

Jara-Coatt, P., Sáez-Delgado, F., Constenla-Núñez, J., & Mella-Norambuena, J. (2026). Competencias socioemocionales y resiliencia del profesorado de educación primaria. Revista Española de Pedagogía, 84(293), 151-170. https://doi.org/10.9781/rep.2026.848

Jara-Coatt, P., Constenla-Nuñez, J., Sáez-Delgado, F. (2025). Modelos competencia socioemocional docente para la innovación educativa. Revista Espacios, 46(03). eISSN: 2739-007. https://doi.org/10.48082/espacios-a25v46n03p21

Johnson-Glenberg, M. C. (2018). Immersive VR and education: Embodied design principles that include gesture and action. Frontiers in Robotics and AI, 5, 81. https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00081

Kluge, M. G., Maltby, S., Walker, N., Bennett, N., Aidman, E., Nalivaiko, E., & Walker, F. R. (2021). Development of a modular stress management platform (Performance Edge VR) and a pilot efficacy trial of a bio-feedback enhanced training module for controlled breathing. PLoS ONE, 16(2), e0245068. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245068

Latoschik, M. E., & Blach, R. (2008). Semantic virtual environments: Core concepts and software architectures. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 14(4), 819–832. https://doi.org/10.1109/TVCG.2008.31

Li, L., Hu, Y., Yang, X., Wu, M., Tao, P., Chen, M., & Yang, C. (2024). Enhancing pre-service teachers' classroom management competency in a large class context: The role of fully immersive virtual reality. Humanities and Social Sciences Communications, 11, 1050. https://doi.org/10.1057/s41599-024-03538-9

Louie, R., Nandi, A., Fang, W., Chang, C., Brunskill, E., & Yang, D. (2024). Roleplay-doh: Enabling domain-experts to create LLM-simulated patients via eliciting and adhering to principles. arXiv. https://arxiv.org/abs/2407.00870

Lozano-Peña, G., Sáez-Delgado, F., & López-Angulo, Y. (2022). Competencias socioemocionales en docentes de primaria y secundaria: una revisión sistemática. Páginas de Educación, 15(1), 01-22. https://doi.org/10.22235/pe.v15i1.2598

Lozano-Peña, G.; Sáez-Delgado, F.; López- Angulo, Y.; Mella-Norambuena, J.; Contreras-Saavedra, C; RamosHuenteo, V., (2023). Programas de intervención docente en competencias socioemocionales: una revisión sistemática de la literatura. Aula de Encuentro, 25 (2), 215-241. https://doi.org/10.17561/ae.v25n2.7391

Lozano-Peña, G., Sáez-Delgado, F., López-Angulo, Y., Mella-Norambuena, J. (2021). Teachers' Social–Emotional Competence: History, Concept, Models, Instruments, and Recommendations for Educational Quality. Sustainability, 13(21), 12142; https://doi.org/10.3390/su132112142

Lozano Peña, G., Sáez-Delgado, F., Bernardo, A., López-Angulo, Y. (2024). Programa de entrenamiento en autorregulación emocional y habilidades sociales para docentes ESED-10. Una guía para promover la autorregulación emocional y habilidades sociales docentes. Santiago: RIL editores, 2024. ISBN: 978-956-01-1609-3. Registro de Propiedad Intelectual Nº 2024-A-6074.

Lugrin, J. L., Latoschik, M. E., Habel, M., Roth, D., & Seaton, R. (2018). Avatar and environment design in virtual reality teacher training environments. IEEE Transactions on Learning Technologies, 11(4), 481–493. https://doi.org/10.1109/TLT.2017.2778248

Makransky, G., & Petersen, G. B. (2021). The Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL): A theoretical framework detailing the relationship between features, media affordances, psychological outcomes, and learning within immersive virtual reality. Educational Psychology Review, 33(3), 937–981. https://doi.org/10.1007/s10648-020-09586-2

Moldoveanu, A., Mitruț, O., Jinga, N., Petrescu, C., Moldoveanu, F., Asavei, V., Anghel, A. M., & Petrescu, L. (2023). Immersive phobia therapy through adaptive virtual reality and biofeedback. Applied Sciences, 13(18), 10365. https://doi.org/10.3390/app131810365

Mouw, J. M., Fokkens-Bruinsma, M., & Snippe, A. (2024). Assessing complex skills in a virtual reality context: Capturing the development of pre-service teachers' classroom management strategies. Education Sciences, 15(1), 2. https://doi.org/10.3390/educsci15010002

Nasri, M., Kosa, M., Chukoskie, L., Moghaddam, M., & Harteveld, C. (2024). Exploring eye tracking to detect cognitive load in complex virtual reality training. En 2024 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct) (pp. 51–54). IEEE.

Ojeda-Rodríguez, B., Vergara-Manquilepe, E., Zapata-Bueno, Q., Sáez-Delgado, F., Jara-Coatt, P., Páez-Bustamante, Y., & Cid-Aguayo, M. (2026). La carga emocional de la docencia: revisión teórica de la relación entre profesorado y apoderados. En Ciências Humanas e os processos de mudança social. ISBN: 978-65-258-3930-1, pp. 124-154. Brasil. Editorial Atena. https://doi.org/10.22533/at.ed.301112612017

Ortony, A., Clore, G. L., & Collins, A. (1988). The cognitive structure of emotions. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511571299

Park, J. S., O'Brien, J. C., Cai, C. J., Morris, M. R., Liang, P., & Bernstein, M. S. (2023). Generative agents: Interactive simulacra of human behavior. Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '23), 1–22. https://doi.org/10.1145/3586183.3606763

Pellas, N., & Mystakidis, S. (2020). 3D virtual worlds in education: A systematic review. Computers & Education, 158, 103988. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.103988

Picard, R. W. (1997). Affective computing. MIT Press. https://doi.org/10.7551/mitpress/1140.001.0001

Quevedo Piratova, D. A., Sánchez Duarte, M., Chiappe, A., & Sáez-Delgado, F. (2025). Intelligent Classrooms: How AI and IoT Can Reshape Learning Spaces. European Journal of Education, 60(1), e70000. https://doi.org/10.1111/ejed.70000

Rojas-García, P., Sáez-Delgado, F., Badilla-Quintana. MG. & Jiménez-Pérez, L. Análisis de intervenciones educativas con videojuegos en educación secundaria: una revisión sistemática. (2022). Texto Livre, 15(e37810), 1-20. https://doi.org/10.35699/1983-3652.2022.37810

Sáez-Delgado, F., Medina, N., Mella-Norambuena, J., Contreras, C. (2024). Regulación emocional y autorregulación académica en docentes de escuelas rurales durante la transición pospandemia. Revista Andina de Educación, 8(1), 1-9. https://doi.org/10.32719/26312816.2024.8.1.8

Sáez-Delgado, F., Mella-Norambuena, J., López-Angulo, Y. (2024). Psychometric properties of the SocioEmotional Skills Instrument for Teachers (SEMS-IT) using Network Approach: English and Spanish versión. Frontiers in Psychology, 15. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1421164

Saéz-Delgado, F., Morales-Maure, L., García-Marimón, O., & Gutiérrez-González, J. (2926). Impacto de un programa formativo basado en reflexión autocrítica y mundos virtuales sobre competencias didácticas y socioemocionales en docentes de matemática. Formación Universitaria, 19(2). http://dx.doi.org/10.4067/s0718-50062026000200127

Sáez-Delgado, F., Mella-Norambuena, J., Coronado, P., López-Angulo, Y., Ramírez, G., Badilla-Quintana, M., & Chiappe, A. (2026). Virtual World Platforms: A Comparative Analysis of Quality According to ISO 25010 Standards and Maturity Models. Virtual Worlds, 5(1), 1-30. https://doi.org/10.3390/virtualworlds5010002

Sáez-Delgado, F., Coronado-Sánchez, P., Mella-Norambuena, J., López-Angulo, Y., Brieba-Fuenzalida, J., Contreras-Saavedra, C., & Lozano-Peña, G. (2025). Use of Digital Technologies to Support Socioemotional Teacher Training: A Systematic Review. Education Sciences, 15(10), 1377. https://doi.org/10.3390/educsci15101377

Sáez-Delgado, F., Jara-Coatt, P., Correa-Gutiérrez, P., Lozano-Peña, G., Morales-Maure, L. (2026). Aulas que Florecen, Editorial: Editorial Hambatu Sapiens.Primera edición: 2026ISBN: 978-9907-805-27-7. DOI: https://doi.org/10.63862/ehs-978-9907-805-27-7

Sehrt, J., Yilmaz, U., Kosch, T., & Schwind, V. (2024). Closing the loop: The effects of biofeedback awareness on physiological stress response using electrodermal activity in virtual reality. Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '24). https://doi.org/10.1145/3613905.3650830

Shanahan, M., McDonell, K., & Reynolds, L. (2023). Role play with large language models. Nature, 623(7987), 493–498.

Slater, M., & Sanchez-Vives, M. V. (2016). Enhancing our lives with immersive virtual reality. Frontiers in Robotics and AI, 3, 74. https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00074

Xu, G., Haratyan, F., & Tian, H. (2026). A systematic review of teacher emotion regulation and well-being: Implications for student engagement, learning outcomes, and professional development in EFL contexts. Frontiers in Psychology, 17, 1715266. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1715266

Zhang, J., Pan, Q., Zhang, D., Meng, B., & Hwang, G.-J. (2024). Effects of virtual reality based microteaching training on pre-service teachers' teaching skills from a multi-dimensional perspective. Journal of Educational Computing Research, 62(5). https://doi.org/10.1177/07356331231226179

SOBRE O ORGANIZADOR

Xosé Somoza Medina (1969, Ourense, España) Licenciado con Grado y premio extraordinario en Geografía e Historia por la Universidad de Santiago de Compostela (1994). Doctor en Geografía e Historia por la misma universidad (2001) y premio extraordinario de doctorado por su Tesis "Desarrollo urbano en Ourense 1895-2000". Profesor Titular en la Universidad de León, donde imparte clases desde 1997. En la Universidad de León fue Director del Departamento de Geografía entre 2004 y 2008 y Director Académico de la Escuela de Turismo entre 2005 y 2008. Entre 2008 y 2009 ejerció como Director del Centro de Innovación y Servicios de la Xunta de Galicia en Ferrol. Entre 2007 y 2009 fue vocal del comité "Monitoring cities of tomorrow" de la Unión Geográfica Internacional. En 2012 fue Director General de Rehabilitación Urbana del Ayuntamiento de Ourense y ha sido vocal del Consejo Rector del Instituto Ourensano de Desarrollo Local entre 2011 y 2015. Ha participado en diversos proyectos y contratos de investigación, en algunos de ellos como investigador principal, con temática relacionada con la planificación urbana, la ordenación del territorio, las nuevas tecnologías de la información geográfica, el turismo o las cuestiones demográficas. Autor de más de 100 publicaciones relacionadas con sus líneas de investigación preferentes: urbanismo, turismo, gobernanza, desarrollo, demografía, globalización y ordenación del territorio. Sus contribuciones científicas más importantes se refieren a la geografía urbana de las ciudades medias, la crisis del medio rural y sus posibilidades de desarrollo, la evolución del turismo cultural como generador de transformaciones territoriales y más recientemente las posibilidades de reindustrialización de Europa ante una nueva etapa posglobalización. Ha participado como docente en masters y cursos de especialización universitaria en Brasil, Bolivia, Colombia, Paraguay y Venezuela y como docente invitado en la convocatoria Erasmus en universidades de Bulgaria (Sofia), Rumanía (Bucarest) y Portugal (Porto, Guimarães, Coimbra, Aveiro y Lisboa). Ha sido evaluador de proyectos de investigación en la Agencia Estatal de Investigación de España y en la Organización de Estados Iberoamericanos (OEI). Como experto europeo en Geografía ha participado en reuniones de la Comisión Europea en Italia y Bélgica. Impulsor y primer coordinador del proyecto europeo URBACT, "come Ourense", dentro del Programa de la Unión Europea "Sostenibilidad alimentaria en comunidades urbanas" (2012-2014). Dentro de la experiencia en organización de actividades de I+D+i se pueden destacar la organización de diferentes reuniones científicas desarrolladas dentro de la Asociación de Geógrafos Españoles (en 2002, 2004, 2012 y 2018).

ÍNDICE REMISSIVO

A

Agentes conversacionales basados en LLM 269
Agua 59, 98, 101, 103, 104, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 114, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 126, 127
Agua potable 98, 101, 103, 107, 108, 110, 111, 112
Aire 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 134, 136, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144
Aire interior 128, 129, 130, 131, 132, 136, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144
Algoritmo computacional 2, 7, 14
Amylose 58, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 67, 69
Análisis multivariante 171, 191, 243, 258, 267
Analítica multimodal del aprendizaje 268, 269, 270, 272, 281, 288
Arquitectura de software 269, 289
Audio-mediación 194, 195, 196, 197, 198, 203, 208, 213
Autómatas 230, 231, 233, 234, 235, 236, 237, 241

B

Bacterial cellulose 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 68, 70, 71
Benzo(a)pireno 128, 129, 136, 143
Bienestar docente 195, 198, 208, 214, 289, 291
Biorretroalimentación 268, 269, 283, 284, 285, 286, 288

C

Calidad del servicio 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229
Caras de Chernoff 171, 175, 178, 186, 187, 190, 191, 243, 245, 262, 263, 264, 266
Cellulose nanocrystals 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 68, 71
Cizallamiento 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 44, 45
Competencias socioemocionales docentes 195, 202, 213
Computación afectiva 268, 269, 270, 273, 274, 289
Conocimiento local 148
Contaminación 129, 130

D

Desarrollo sostenible 98, 113
Dificultades 56, 91, 230, 232, 233, 234, 241, 242

E

Educación en ingeniería 72, 76, 77, 81, 242
Energía hidroeléctrica 98
Energía maremotriz 114
Energía Renovable 98, 113
Entrenamiento Socioemocional Docente 268, 269, 271, 289
ERIM 46, 47, 48, 50, 51, 52, 55, 56
Escritura académica 72, 74, 76
Estadística aplicada 243
Ética del diseño tecnológico 195

F

Fiabilidad 46, 47, 50, 55, 114, 217, 220, 222, 223, 225, 226, 227, 228
Fidelidad psicológica 269, 270, 280, 283, 289
Formación investigativa 72, 74, 76, 77, 79, 96
Formulación lagrangiana 2, 4
Frequency analysis 16
Fuerza de corte 32, 33, 35, 36, 39, 41, 42, 44, 45

G

Gestión pública local 217, 219, 226

H

Huertos familiares 148, 149, 150, 152, 154, 157

I

Inteligencia artificial 72, 74, 75, 76, 77, 78, 81, 88, 89, 96, 197, 211, 212, 214, 217, 218, 219, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 271, 272, 288
Inteligencia artificial generativa 72, 74, 76, 77, 89, 96, 272

K

Knowledge translation 160, 164, 165, 166

M

Marco teórico 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 87, 88, 89, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 202
Mareas 114, 115, 116, 117, 118, 122, 123, 126
Matemáticas 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 240, 241, 242
Mechanical systems 16
Media representation 160, 161, 163
Microturbina 98, 108, 109
Modelo dinámico 1, 2, 3, 4, 7, 14
Modelo ECOS 194, 195, 198, 204, 205, 206, 207, 209, 210, 211, 213
Modelo SEED 268, 269, 270, 284, 285, 286, 289, 290
Modelo SERVQUAL 217, 220, 222, 224
Mundo virtual 268, 269, 270, 271, 284, 288, 289

N

Non-destructive testing 16, 20
Nuclear energy communication 159, 160, 161, 164, 166, 167, 168, 169

P

Plantas alimenticias 148, 149, 151
Plantas medicinales 148, 149, 150, 151, 154, 158
Podcast educativo 194, 195, 196, 197, 198, 213
Predictive maintenance 16
Public meaning 160, 161, 163, 167, 168

R

Razonamiento estadístico 171, 173, 175, 176
Realidad virtual inmersiva 269
Rendimiento académico 171, 178, 180, 243, 257, 259, 261, 266
Reproducibilidad 171, 172, 173, 174, 175, 176, 188, 190, 191, 243
Resolución ejercicios 230
Resonancia 114, 115, 122, 123, 124, 126, 127
RMarkdown 171, 172, 175, 176, 179, 188, 189, 191

S

Science communication 160, 162, 163, 167, 168, 169, 170
Silueta 32, 185

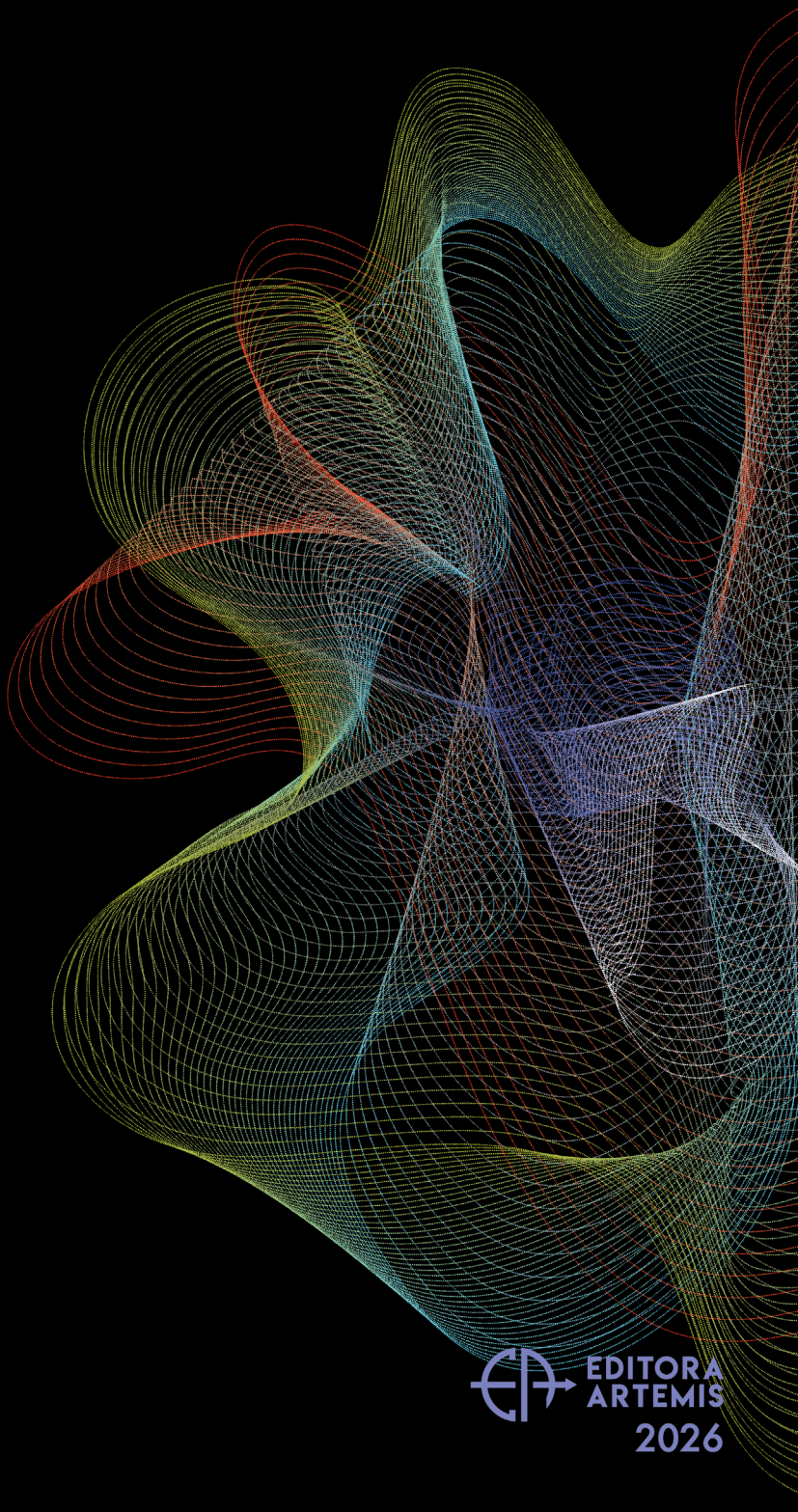
Starch 58, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71
Structural health monitoring 16

T

TPM 46, 47, 50, 51, 57
Transformación digital 217, 219, 221

V

Vibration-based identification 16
Vibration diagnostics 16, 18, 20



EDITORA ARTEMIS
2026