



Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Volumen 28 - Número 79
Enero - Marzo de 2024

p-ISSN: 0123-921X
e-ISSN: 2248-7638



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Revista TECNURA
Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

p-ISSN: 0123-921X - e-ISSN: 2248-7638

EDITOR

Ph.D. Alexander Jiménez Triana
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Ing. Juan Antonio Conesa
Universidad de Alicante, España

EDITOR ASISTENTE

MSc. Ronald González Silva

Ph.D. Ing. Manuel Karim Sapag
Universidad Nacional de San Luis, Argentina

COMITÉ EDITORIAL

Ph.D Jimmy Barco Burgos
Concordia University, Canada

Ph.D. Ing. Steven M. LaValle
University of Illinois, Estados Unidos

Ph.D. Ing. Edgar Francisco Vargas
Universidad de Los Andes, Colombia

Ph.D. Martín Pedro Gómez
Comisión Nacional de Energía Atómica. Argentina

Ph.D. Ing. Ingrid Patricia Páez Parra
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

EVALUADORES

Edwin José López Benítez
Universidad Nacional de Colombia

Ph.D. Ing. Johan José Sánchez Mora
Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Carlos Franco
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Ph.D. Ing. José Antonio Velásquez Costa
Universidad Ricardo Palma, Perú

Diana López
Universidad Nacional de Colombia

Ph.D. Ing. Mario Ricardo Arbulu Saavedra
Universidad de La Sabana, Colombia

Jairo Alberto Villegas Flórez
Universidad Tecnológica de Pereira

Ph.D. Diego Luis González
Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italia

Pedro Fernando Melo Daza
Fundación Universitaria Los Libertadores

Ph.D. Julyan Cartwright
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España

German Hernández
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Ph.D. Oreste Piro
Universidad de les Illes Balears, España

Jaime Enrique Orduy Rodríguez
Fundación Universitaria Los Libertadores

COMITÉ CIENTÍFICO

Ph.D. Ing. Alfonso Prieto Guerrero
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Juan Carlos Figueroa-García
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Ph.D. Ing. Enrique Rodríguez de la Colina
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Romel Jesús Gallardo Amaya
Universidad Francisco de Paula Santander

Ph.D. Ing. Fernando Martirena
Universidad Central de Las Villas, Cuba

Ferney Giraldo
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Ph.D. Ing. Jorge Mario Gómez
Universidad de Los Andes, Colombia

COORDINACIÓN EDITORIAL

Fernando Piraquive
Oficina de Investigaciones
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

REVISTA TECNURA

La revista Tecnura es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de carácter científico-tecnológico, arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformación de sus comités Científico y Editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

PERIODICIDAD

Es una publicación de carácter científico-tecnológico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre del año 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

COBERTURA TEMÁTICA

Las áreas temáticas de interés de la revista Tecnura están enfocadas a todos los campos de la ingeniería, como la electrónica, telecomunicaciones, electricidad, sistemas, industrial, mecánica, catastral, civil, ambiental, entre otras. Sin embargo, no se restringe únicamente a estas, también tienen cabida los temas de educación y salud, siempre y cuando estén relacionados con la ingeniería. La revista publicará únicamente artículos de investigación científica y tecnológica, de reflexión y de revisión.

MISIÓN

La revista Tecnura tiene como misión divulgar resultados de proyectos de investigación realizados en el área de la ingeniería, a través de la publicación de artículos originales e inéditos, realizados por académicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden público o privado.

PÚBLICO OBJETIVO

La revista Tecnura está dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales interesados en la actualización permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigación científico-tecnológica, en el campo de la ingeniería.

INDEXACIÓN

Tecnura es una publicación de carácter académico indexada en los índices regionales pubindex indexada y clasificada en categoría B, Scielo Colombia y Redalyc (México); además de las siguientes bases bibliográficas: INSPEC del Institution of Engineering and Technology (Inglaterra), Fuente Académica Premier de EBSCO (Estados Unidos), CABI (Inglaterra), IndexCorpernicus (Polonia), Informe Académico de Gale Cengage Learning (México), Periódica de la Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (España) y Dialnet de la Universidad de la Rioja (España); también hace

parte de los siguientes directorios: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Latindex (México); Índice Bibliográfico Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (España), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

FORMA DE ADQUISICIÓN

La revista Tecnura se puede adquirir a través de canje o suscripción en el portal de la de la revista.

REPRODUCCIÓN

Se autoriza la reproducción total o parcial de los artículos de esta revista para uso académico o interno de las instituciones citando la fuente y el autor. Las ideas expresadas se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial de la revista.

DIRECCIÓN POSTAL

Enviar a Ph.D. Alexander Jiménez Triana
Director y Editor Revista Tecnura
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305
Facultad Tecnológica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Dirección: Cl. 68d Bis A Sur # 49 F - 70, Bogotá
Teléfono: 571-3239300
Bogotá, D.C., Colombia
Correo electrónico:
tecnura.ud@udistrital.edu.co
Tecnura en internet:
<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA ESPAÑOL

MSc. Fernando Carretero Padilla

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA INGLÉS

MSc. Alexander Olave

DISEÑO DE CUBIERTA

Andrés Enciso

DIAGRAMACIÓN Y DISEÑO L^AT_EX*

MSc. Julian Arcila-Forero

*Modificada bajo las condiciones del LaTeX Project Public License
<http://www.latex-project.org/lppl.txt>



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

TECNURA Journal
Technology And Culture, Affirming Knowledge
District University Francisco José De Caldas
Faculty Of Technology

p-ISSN: 0123-921X - e-ISSN: 2248-7638

EDITOR

Ph.D. Alexander Jiménez Triana
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

ASSISTANT EDITOR

MSc. Ronald González Silva

EDITORIAL COMMITTEE

Ph.D Jimmy Barco Burgos
Concordia University, Canada

Ph.D. Ing. Edgar Francisco Vargas
Universidad de Los Andes, Colombia

Ph.D. Ing. Ingrid Patricia Páez Parra
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph.D. Ing. Johan José Sánchez Mora
Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Ph.D. Ing. José Antonio Velásquez Costa
Universidad Ricardo Palma, Perú

Ph.D. Ing. Mario Ricardo Arbulu Saavedra
Universidad de La Sabana, Colombia

Ph.D. Diego Luis González
Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italia

Ph.D. Julyan Cartwright
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España

Ph.D. Oreste Piro
Universidad de les Illes Balears, España

SCIENTIFIC COMMITTEE

Ph.D. Ing. Alfonso Prieto Guerrero
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Ph.D. Ing. Enrique Rodríguez de la Colina
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Ph.D. Ing. Fernando Martirena
Universidad Central de Las Villas, Cuba

Ph.D. Ing. Jorge Mario Gómez
Universidad de Los Andes, Colombia

Ph.D. Ing. Juan Antonio Conesa
Universidad de Alicante, España

Ph.D. Ing. Manuel Karim Sapag
Universidad Nacional de San Luis, Argentina

Ph.D. Ing. Steven M. LaValle
University of Illinois, Estados Unidos

Ph.D. Martín Pedro Gómez
Comisión Nacional de Energía Atómica. Argentina

EVALUATORS

Edwin José López Benítez
Universidad Nacional de Colombia

Carlos Franco
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Diana López
Universidad Nacional de Colombia

Jairo Alberto Villegas Flórez
Universidad Tecnológica de Pereira

Pedro Fernando Melo Daza
Fundación Universitaria Los Libertadores

German Hernández
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Jaime Enrique Orduy Rodríguez
Fundación Universitaria Los Libertadores

Juan Carlos Figueroa-García
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Romel Jesús Gallardo Amaya
Universidad Francisco de Paula Santander

Ferney Giraldo
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

EDITORIAL COORDINATION

Fernando Piraquive
Oficina de Investigaciones
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

TECNURA JOURNAL

Tecnura Journal is an institutional scientific-technological publication from the Faculty of Technology at District University Francisco José de Caldas, arbitrated by means of a double-blinded peer review process. The periodicity for its Scientific and Editorial committees line-up is subject to the publication of articles in internationally indexed magazines by its own members.

PERIODICITY

Tecnura journal is a scientific-technological publication with quarterly periodicity, published in January, April, July and October. Its first edition appeared in the second term, 1997 and its editions have normally continued from that year and on.

THEMATIC COVERAGE

The thematic areas of interest at Tecnura journal are focused on all fields of engineering such as electrical, telecommunications, electrical, computer, industrial, mechanical, cadastral, civil, environmental, etc. However, it is not restricted to those, there is also room for education and health topics as well, as long as they are related to engineering. The journal will only publish scientific and technological research, reflection and review articles.

MISSION

Tecnura journal is aimed at publishing research project results carried out in the field of engineering, through the publishing of original and unpublished articles written by academics and professionals from national or international public or private institutions.

TARGET AUDIENCE

Tecnura journal is directed to professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and the monitoring of the scientific-technological research processes in the field of engineering.

INDEXING

Tecnura is an academic publication indexed in the Regional Index Scielo Colombia (Colombia) and Redalyc (México); as well as the following bibliographic databases: INSPEC of the Institution of Engineering and Technology (England), Fuente Académica Premier of EBSCO (United States), CABI (England), Index Copernicus (Poland), Informe Académico of Gale Cengage Learning (México), Periódica of the Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (Spain) and Dialnet of the Universidad de la Rioja (Spain); it is also part of the

following directories: Online Regional Information System for Scientific journals from Latin America, Caribbean, Spain and Portugal Latindex (México), bibliographic index Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (Spain), DOAJ (Sweden), Ulrich of Proquest (United States).

FORM OF ACQUISITION

Tecnura journal is available through purchase, exchange or subscription.

REPRODUCTION

The total or partial reproduction of the articles of this journal is authorized for academic or internal purpose of the institutions citing the source and the author. Ideas expressed are published under exclusive responsibility of the authors and they do not necessarily reflect the thought of the editorial committee of the journal.

POSTAL ADDRESS

Enviar a Ph.D. Alexander Jiménez Triana
Director y Editor Revista Tecnura
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305
Facultad Tecnológica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Dirección: Cl. 68d Bis A Sur # 49 F - 70, Bogotá
Teléfono: 571-3239300
Bogotá, D.C., Colombia
E-mail:
tecnura.ud@udistrital.edu.co
Tecnura on internet:
<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

STYLE CORRECTION IN SPANISH

MSc. Fernando Carretero Padilla

STYLE CORRECTION IN ENGLISH

MSc. Alexander Olave

TITLE PAGE DISEGN

Andrés Enciso

LAYOUT AND L^AT_EX* DESIGN

MSc. Julian Arcila-Forero

* modified under the conditions of the LaTeX Project Public License
<http://www.latex-project.org/lppl.txt>

El comité editorial de la revista **Tecnura** está comprometido con altos estándares de ética y buenas prácticas en la difusión y transferencia del conocimiento, para garantizar el rigor y la calidad científica. Es por ello que ha adoptado como referencia el Código de Conducta que, para editores de revistas científicas, ha establecido el Comité de Ética de Publicaciones (COPE: Committee on Publication Ethics) dentro de los cuales se destaca:

Obligaciones y responsabilidades generales del equipo editorial

En su calidad de máximos responsables de la revista, el comité y el equipo editorial de **Tecnura** se comprometen a:

- Aunar esfuerzos para satisfacer las necesidades de los lectores y autores.
- Propender por el mejoramiento continuo de la revista.
- Asegurar la calidad del material que se publica.
- Velar por la libertad de expresión.
- Mantener la integridad académica de su contenido.
- Impedir que intereses comerciales comprometan los criterios intelectuales.
- Publicar correcciones, aclaraciones, retractaciones y disculpas cuando sea necesario.

Relaciones con los lectores

Los lectores estarán informados acerca de quién ha financiado la investigación y sobre su papel en la investigación.

Relaciones con los autores

Tecnura se compromete a asegurar la calidad del material que publica, informando sobre los objetivos y normas de la revista. Las decisiones de los editores para aceptar o rechazar un documento para su publicación se basan únicamente en la relevancia del trabajo, su originalidad y la pertinencia del estudio con relación a la línea editorial de la revista. La revista incluye una descripción de los procesos seguidos en la evaluación por pares de cada trabajo recibido. Cuenta con una guía de autores en la que se presenta esta información. Dicha guía se actualiza regularmente y contiene un vínculo a la presente declaración ética. Se reconoce el derecho de los autores a apelar las decisiones editoriales. Los editores no modificarán su decisión en la aceptación de envíos, a menos que se detecten irregularidades o situaciones extraordinarias. Cualquier cambio en los miembros del equipo editorial no afectará las decisiones ya tomadas, salvo casos excepcionales en los que confluyan graves circunstancias.

Relaciones con los evaluadores

Tecnura pone a disposición de los evaluadores una guía acerca de lo que se espera de ellos. La identidad de los evaluadores se encuentra en todo momento protegida, garantizando su anonimato.

Proceso de evaluación por pares

Tecnura garantiza que el material remitido para su publicación será considerado como materia reservada y confidencial mientras que se evalúa (doble ciego).

Reclamaciones

Tecnura se compromete responder con rapidez a las quejas recibidas y a velar para que los demandantes insatisfechos puedan tramitar todas sus quejas. En cualquier caso, si los interesados no consiguen satisfacer sus reclamaciones, se considera que están en su derecho de elevar sus protestas a otras instancias.

Fomento de la integridad académica

Tecnura asegura que el material que publica se ajusta a las normas éticas internacionalmente aceptadas.

Protección de datos individuales

Tecnura garantiza la confidencialidad de la información individual (por ejemplo, de los profesores y/o alumnos participantes como colaboradores o sujetos de estudio en las investigaciones presentadas).

Seguimiento de malas prácticas

Tecnura asume su obligación para actuar en consecuencia en caso de sospecha de malas prácticas o conductas inadecuadas. Esta obligación se extiende tanto a los documentos publicados como a los no publicados. Los editores no sólo rechazarán los manuscritos que planteen dudas sobre una posible mala conducta, sino que se consideran éticamente obligados a denunciar los supuestos casos de mala conducta. Desde la revista se realizarán todos los esfuerzos razonables para asegurar que los trabajos sometidos a evaluación sean rigurosos y éticamente adecuados.

Integridad y rigor académico

Cada vez que se tenga constancia de que algún trabajo publicado contiene inexactitudes importantes, declaraciones engañosas o distorsionadas, debe ser corregido de forma inmediata.

En caso de detectarse algún trabajo cuyo contenido sea fraudulento, será retirado tan pronto como se conozca, informando inmediatamente tanto a los lectores como a los sistemas de indexación.

Se consideran prácticas inadmisibles, y como tal se denunciarán las siguientes: el envío simultáneo de un mismo trabajo a varias revistas, la publicación duplicada o con cambios irrelevantes o parafraseo del mismo trabajo, o la fragmentación artificial de un trabajo en varios artículos.

Relaciones con los propietarios y editores de revistas

La relación entre editores, editoriales y propietarios estará sujeta al principio de independencia editorial. **Tecnura** garantizará siempre que los artículos se publiquen con base en su calidad e idoneidad para los lectores, y no con vistas a un beneficio económico o político. En este sentido, el hecho de que la revista no se rija por intereses económicos, y defienda el ideal de libre acceso al conocimiento universal y gratuito, facilita dicha independencia.

Conflicto de intereses

Tecnura establecerá los mecanismos necesarios para evitar o resolver los posibles conflictos de intereses entre autores, evaluadores y/o el propio equipo editorial.

Quejas/denuncias

Cualquier autor, lector, evaluador o editor puede remitir sus quejas a los organismos competentes

The editorial board of *Tecnura* journal is committed to ethics high standards and good practice for knowledge dissemination and transfer, in order to ensure rigour and scientific quality. That is why it has taken as reference the Code of Conduct, which has been established by the Committee on Publication Ethics (COPE) for scientific journal editors; outlining the following:

General duties and responsibilities of the editorial board

As most responsible for the journal, **Tecnura** committee and the editorial board are committed to:

- Joining efforts to meet the readers and authors' needs.
- Tending to the continuous improvement of the Journal.
- Ensuring quality of published material.
- Ensuring freedom of expression.
- Maintaining the academic integrity of their content.
- Prevent commercial interests compromise intellectual standards.
- Post corrections, clarifications, retractions and apologies when necessary.
- Relations with readers.
- Readers will be informed about who has funded re- search and their role in the research.

Relations with authors

Tecnura is committed to ensuring the quality of published material, informing the goals and standards of the journal. The decisions of publishers to accept or reject a paper for publication are based solely on the relevance of the work, originality and pertinence of the study with journal editorial line. The journal includes a description of the process for peer evaluation of each received work, and has an authors guide with this information. The guide is regularly updated and contains a link to this code of ethics. The journal recognizes the right of authors to appeal editorial decisions Publishers will not change their decision in accepting or rejecting articles, unless extraordinary circumstances or irregularities are detected. Any change in the editorial board members will not affect decisions already made, except for unusual cases where serious circumstances converge.

Relations with evaluators

Tecnura makes available to reviewers a guide to what is expected from them. Reviewers' identity is protected at all times, ensuring anonymity.

Peer review process

Tecnura ensures that material submitted for publication will be considered private and confidential issue while being reviewed (double blind).

Claims

Tecnura is committed to respond quickly to complaints and ensure that dissatisfied claimant can process all complaints. In any case, if applicants fail to satisfy their claims, the journal considers that they have the right to raise their protests to other instances.

Promoting Academic Integrity

Tecnura ensures that the published material conforms to internationally accepted ethical standards.

Protection of individual data

Tecnura guarantees the confidentiality of individual information (e.g. participant teachers and/or students as collaborators or subjects of study in the presented research).

Tracking malpractice

Tecnura accepts the obligation to act accordingly in case of suspected malpractice or misconduct. This obligation extends both to published and unpublished documents. The editors not only reject manuscripts with doubts about possible misconduct, but they are considered ethically obligated to report suspected cases of misconduct. From the journal every reasonable effort is made to ensure that works submitted for evaluation are rigorous and ethically appropriate.

Integrity and academic rigour

Whenever evidence that a published work contains significant misstatements, misleading or distorted statements, it must be corrected immediately.

In case of any work with fraudulent content is detected, it will be removed as soon as it is known, and immediately informing both readers and indexing systems.

Practices that are considered unacceptable and as such will be reported: simultaneous sending of the same work to various journals, duplicate publication with irrelevant changes or paraphrase of the same work, or the artificial fragmentation of a work in several articles.

Relations with owners and journal editors

The relation between editors, publishers and owners will be subject to the principle of editorial independence. **Tecnura** will ensure that articles are published based on their quality and suitability for readers, and not for an economic or political gain. In this sense, the fact that the journal is not governed by economic interests, and defends the ideal of universal and free access to knowledge, provides that independence.

Conflict of interest

Tecnura will establish the necessary mechanisms to avoid or resolve potential conflicts of interest between authors, reviewers and/or the editorial board itself.

Complaints / allegations

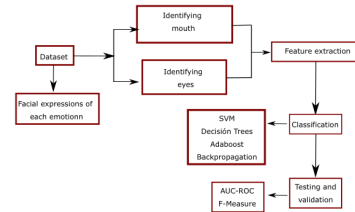
Any author, reader, reviewer or editor may refer their complaints to the competent authorities.



Emotion Recognition in the Eye Region Using Textural Features, IBP and HOG 12

Reconocimiento de Emociones en la Región de los Ojos Utilizando Características Texturales, IBP y HOG

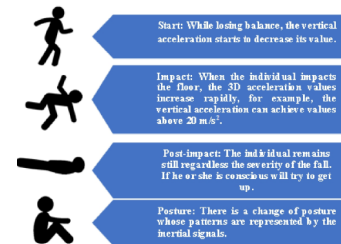
Laura D. Jalili, Josué Espejel-Cabrera, Jair Cervantes y Farid García-Lamont



Pre-and-post impact fall detection based on support vector machines using inertial and barometric pressure data 34

Detección de caídas con máquinas de soporte vectorial identificando pre y post impacto con datos inerciales y presión barométrica

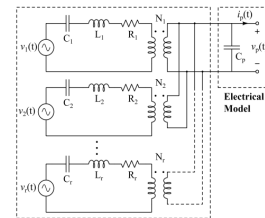
Roberth Álvarez Jiménez¹, Edith Pulido Herrera, Andrés F. Ruiz-Olaya, Daniel Alfonso Sierra Bueno



Optimum load computation of a piezoelectric-based energy harvester 53

Cálculo de la carga óptima de un sistema de cosecha basado en el efecto piezoeléctrico

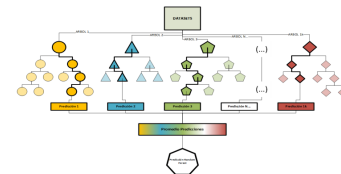
Andrés Felipe Gomez-Casseres



Application of machine learning for predictions of consecutive dependent data of type $\{(a, b) \rightarrow c\} \rightarrow d$ 66

Aplicación de machine learning para predicciones de datos dependientes consecutivos de tipo $\{(a, b) \rightarrow c\} \rightarrow d$

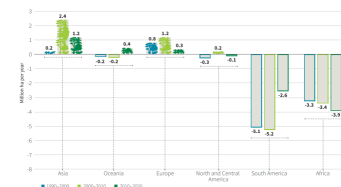
Diego Alexander Quevedo Piratova, Jhon Uberney Londoño Villalba, Arnaldo Andres Gonzalez Gomez



Simulation of the growth and yield of the species Gmelina arborea Roxb 87

Simulación del crecimiento y el rendimiento de la especie Gmelina arborea Roxb

Jairo Alonso Tunjano, Juan Pablo Orejuela Cabrera, Germán Jairo Hernández Pérez





Propuesta de modelo para la implementación de herramientas logísticas en las empresas del Área Metropolitana de Centro Occidente (Risaralda, Colombia) **109**

Proposal of a model for the implementation of logistics tools in the companies of the AMCO Risaralda (Colombia)

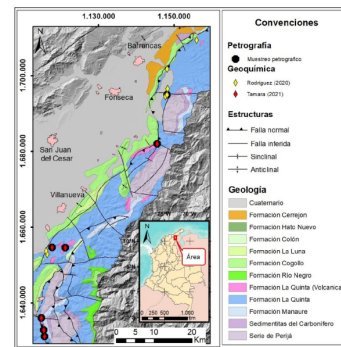
Mariana Losada Agudelo, María Elena Bernal Loaiza, Diego Fernando Ordoñez Rosero



Aspectos tectónicos en la génesis de la Formación La Quinta y su relación con los depósitos minerales de cobre en la serranía del Perijá, Colombia **123**

Tectonics aspects in the genesis of the La Quinta Formation and its relationship with the copper mineral deposits in the Perija Mountain Range, Colombia

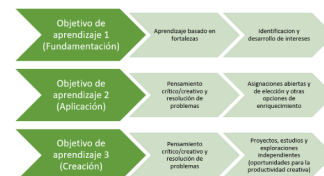
Deyvid Tamara Roncancio, Elías Rojas Martínez, Luis Quintero López, Frank Lascarro Navarro, Dino Carmelo Manco Jaraba



Resultados de aprendizaje en ingeniería para niños con altas capacidades intelectuales **140**

Engineering learning outcomes for children with high intellectual abilities

Cristian Lozano Tafur, Nelson Eduardo Lozano Espinosa, Didier Aldana Rodríguez



Instrucciones para los autores **151**

Instructions for authors **164**

Emotion Recognition in the Eye Region Using Textural Features, IBP and HOG

Reconocimiento de Emociones en la Región de los Ojos Utilizando Características Texturales, IBP y HOG

Laura D. Jalili ¹, Josué Espejel-Cabrera ², Jair Cervantes ³ y Farid García-Lamont ⁴

Fecha de Recepción: 30 de enero de 2023

Fecha de Aceptación: 25 de abril de 2024

Cómo citar: Dominguez-Jalili., L.Y., Espejel-Cabrera J., Cervantes J. y García-Lamont F. (2024). Emotion recognition by eyes region using textural features, lbp and hog. *Tecnura*, 28(79), 12-33. <https://doi.org/10.14483/22487638.22100>

ABSTRACT

Objective: Our objective is to develop a robust emotion recognition system based on facial expressions, with a particular emphasis on two key regions: the eyes and the mouth. This paper presents a comprehensive analysis of emotion recognition achieved through the examination of various facial regions. Facial expressions serve as invaluable indicators of human emotions, with the eyes and mouth being particularly expressive areas. By focusing on these regions, we aim to accurately capture the nuances of emotional states.

Methodology: The algorithm we devised not only detects facial features but also autonomously isolates the eyes and mouth regions. To enhance classification accuracy, we utilized various feature extraction and selection techniques. Subsequently, we assessed the performance of multiple classifiers, including Support Vector Machine (SVM), Logistic Regression, Bayesian Regression, and Decision Trees, to identify the most effective approach.

¹She received her Bachelor's degree in Computer Engineering from the Autonomous University of the State of Mexico, Mexico, in 2014. Subsequently, she pursued both her Master's and Doctorate degrees at the same institution, completing them in 2018 and 2022 respectively. Since 2018, she has served as a professor in the Department of Computing at the Autonomous University of the State of Mexico (CU UAEMex-Textoco). Her research interests encompass pattern recognition, neural networks, and data science.

Email: lydominguezj@uaemex.mx

²Received his Bachelor's degree in computer sciences from C.U UAEM Texoco in 2012, and in 2015 received his master's degree in computer sciences. get into the private sector for a few years, and come back to C.U UAEM Texoco to study a Ph. D. in computer sciences and obtain his degree in 2022. His research interests include deep learning, computer vision, and pattern recognition.

Email: jespejelc331@alumno.uaemex.mx

³Received the B.S. degree in Mechanical Engineering from Orizaba Technologic Institute, Veracruz, Mexico, in 2001 and the M.S degree and Ph. D. from CINVESTAV-IPN, México, in 2005 and 2009. Since 2010, he has been a professor of the Departamento de Computación, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex-Textoco). His research interests include support vector machines, pattern classification, neural networks, fuzzy logic and clustering. jcervantes@uaemex.mx

⁴Farid Garcia-Lamont received a PhD degree in Computer Science from CINVESTAV-IPN, Mexico in 2010. Since 2012 he has been professor at the Autonomous University of State of Mexico. His research interests are pattern recognition, applications of artificial intelligence and image processing.

Email: fgarcial@uaemex.mx

Results: Our experimental methodology involved employing various classification techniques to assess performance across different models. Among these, SVM exhibited exceptional performance, boasting an impressive accuracy rate of 99.2%. This outstanding result surpassed the performance of all other methods examined in our study. Through meticulous examination and experimentation, we explore the effectiveness of different facial regions in conveying emotions. Our analysis encompasses two datasets and evaluation methodologies to ensure a comprehensive understanding of emotion recognition capabilities.

Conclusions: Our investigation presents compelling evidence that analyzing the eye region using a Support Vector Machine (SVM) along with textural, HoG, and LBP features achieves an outstanding accuracy rate of 99.2%. This remarkable finding underscores the significant potential of prioritizing the eyes alone for precise emotion recognition. In doing so, it challenges the conventional approach of including the entire facial area for analysis.

Keywords: Emotion recognition, regions, textural features, LBP, HoG

RESUMEN

Objetivo: Nuestro objetivo es desarrollar un sistema robusto de reconocimiento de emociones basado en expresiones faciales, con especial énfasis en dos regiones clave: los ojos y la boca. Este artículo presenta un análisis exhaustivo del reconocimiento de emociones logrado mediante el examen de varias regiones faciales. Las expresiones faciales sirven como indicadores invaluable de las emociones humanas, siendo los ojos y la boca áreas particularmente expresivas. Al centrarnos en estas regiones, nuestro objetivo es capturar con precisión los matices de los estados emocionales.

Metodología: El algoritmo que ideamos no sólo detecta rasgos faciales, sino que también aísla de forma autónoma las regiones de los ojos y la boca. Para aumentar la precisión de la clasificación, utilizamos varias técnicas de extracción y selección de características. Posteriormente, evaluamos el rendimiento de múltiples clasificadores, incluida la máquina de vectores de soporte (SVM), la regresión logística, la regresión bayesiana y los árboles de decisión, para identificar el enfoque más eficaz.

Resultados: Nuestra metodología experimental implicó la utilización de varias técnicas de clasificación para evaluar el rendimiento en diferentes modelos. Entre ellos, la SVM exhibió un rendimiento excepcional, con una impresionante tasa de precisión del 99,2%. Este resultado sobresaliente superó el rendimiento de todos los demás métodos examinados en nuestro estudio. A través de un examen y una experimentación meticolosos, exploramos la eficacia de diferentes regiones faciales para transmitir emociones. Nuestro análisis abarca dos conjuntos de datos y metodologías de evaluación para garantizar una comprensión integral del reconocimiento de emociones.

Conclusiones: Nuestra investigación presenta evidencia convincente de que cuando se analiza la región del ojo utilizando la máquina de vectores de soporte (SVM) junto con las características de textura, HoG y LBP, se obtiene singularmente una tasa de precisión excepcional del 99,2%. Este notable hallazgo subraya el importante potencial de priorizar únicamente los ojos para el reconocimiento preciso de las emociones. Al hacerlo, desafía el enfoque convencional de incluir toda el área facial para el análisis.

Palabras clave: Reconocimiento de emociones, regiones, Características texturales, LBP, HoG

INTRODUCTION

The COVID-19 pandemic has profoundly reshaped our interactions, leading to a surge in digital learning, remote work, online shopping, and other virtual activities. Notably, it has also impacted the performance of automated systems, particularly in facial recognition ([Manley et al., 2022](#)). With masks becoming an integral part of our daily attire, traditional facial recognition systems are struggling to maintain accuracy and efficiency, especially as concerns emotion detection ([Kaur et al., 2022](#)). This paper introduces a novel method designed for emotion recognition under these altered conditions, offering a comparative analysis of our findings.

The advancement of vision systems has found applications across diverse sectors, including agriculture ([Cervantes et al., 2017](#), [AlHaditi et al., 2016](#)), medicine ([Gonzalez et al., 2017](#), [Villan et al., 2017](#)) and industry ([Casas et al., 2017](#), [Sanchez et al., 2017](#)). Emotion recognition has similarly benefited from significant technological progress.

Emotion recognition presents unique challenges due to the intricate and often ambiguous nature of variables influencing emotional states. Emotions manifest differently across individuals, making their recognition a complex endeavour. However, it holds significant importance in various domains, from human health to interpersonal relationships and decision-making processes.

Facial expressions serve as a primary channel of nonverbal communication, conveying our specific moods and offering insights into our interactions. While systems for emotion recognition have explored multiple variables like voice and body movements, the human face remains the most prominent medium for the display of emotion. Moreover, involuntary facial movements often unconsciously reveal our emotional states.

Despite the advancements in emotion recognition technology, most existing systems rely on capturing the entire face to detect emotions. Given the current "new normal" where parts of the face, particularly the mouth area, may be obscured by masks, there is a pressing need for algorithms capable of recognizing emotions from partial facial cues.

In this study, we propose a methodology centred on facial expressions for the recognition of six universally recognized emotions: anger, fear, disgust, happiness, sadness, and surprise, as categorized by Paul Ekman ([Ekman, 1993](#)).

RELATED WORK

The study of emotion recognition encompasses several crucial steps, including preprocessing, face detection, and feature extraction techniques, all aimed at enhancing classification accuracy. Preprocessing plays an important role in refining images for optimal results. Notably, histogram equalization emerges as a standout preprocessing technique, facilitating an even intensity distribution across the image, thereby improving tonal consistency for enhanced analysis. Additionally, various filters are employed as needed, with Gaussian filters being a common choice for edge smoothing in most systems ([Rao et al., 2019](#)).

In face detection, the widely utilized Viola-Jones technique stands as a cornerstone method ([Rao et al., 2019](#), [Xiaohua et al., 2019](#), [Chakraborty et al., 2009](#), [He & Zhang, 2018](#)). However, critiques regarding its efficiency in handling facial occlusion have led researchers to explore alternatives like the Multi-task Cascade Convolutional Neural Network (MTCNN), leveraging its state and regression vector-based approach for improved performance ([Hossain & Muhammad, 2019](#)).

On the classification front, Support Vector Machines (SVM) and Convolutional Neural Networks (CNN) are among the most prevalent choices. While SVMs exhibit higher error rates compared to CNNs, the latter's computational intensity and the large amount of data required for CNNs pose challenges for practical implementation ([Rao et al., 2019](#), [Hossain & Muhammad, 2019](#)).

Recent years have seen a surge in research efforts aimed at emotion recognition, with diverse approaches leveraging various input modalities such as voice, environmental noise, hand and body movements, and facial expressions. For instance, some studies combine facial and voice features, utilizing algorithms like Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCC) for voice analysis alongside methods like MSER and Viola-Jones for facial feature extraction. However, the ascendancy of CNNs in recent years has reshaped this landscape ([Rao et al., 2019](#), [Hossain & Muhammad, 2019](#)).

Alternatively, sensor-based systems offer a novel avenue for emotion detection, albeit with concerns about the invasiveness of their everyday use. Hybrid approaches combining CNNs and recurrent neural networks (RNNs) have gained traction, while electroencephalography (EEG) signals serve as potent indicators of emotional states. Features extracted from EEG signals, including frequency, time, and wavelet characteristics, enable the discernment of emotional responses to audio or

visual stimuli (Liang *et al.*, 2019, Kurbalija *et al.*, 2018, Chen *et al.*, 2018).

Facial and bodily movements also play a vital role in emotion recognition, with techniques ranging from 3D sequence analysis employing Riemann's analysis to identify facial expression deformations to mesh-based approaches for facial movement tracking. Body movement tracking involves the identification of interest points and subsequent extraction using algorithms like three-dimensional movement with temporal Hidden Markov Models (HMM) (Santhoshkumar & Geetha, 2019, Amor *et al.*, 2014).

METHODOLOGY

Facial expressions serve as a crucial form of non-verbal communication, offering insights into an individual's emotional state. These expressions manifest across various regions of the face, including the eyes, eyebrows, nose, and mouth. For this project, our focus narrows to the intricate dynamics of the mouth and eyes. These areas, known for their significance in conveying emotions, are selected as our primary areas of interest.

The methodology employed in this research endeavor is meticulously outlined and depicted in Figures 1 and 2, offering a comprehensive overview of our proposed approach.

To begin our analysis, we extract the regions of interest from each image, focusing specifically on the mouth and eyes. The feature extraction process involves isolating the eyes and mouth regions independently, enabling a comprehensive examination of each area.

For feature extraction, we employ three distinct techniques: Haralick Textural features, Histograms of Ordered Gradients (HOG) and Local Binary Patterns (LBP), applied to both the eyes and mouth regions. These techniques enable us to capture intricate details and patterns crucial for emotion classification. Additionally, all color images are converted to grayscale to facilitate feature extraction. Remarkably, due to the grayscale nature of the original images, preprocessing steps were deemed unnecessary for training our final model.

Region of interes

Initially, attempts were made to extract the areas of interest using a cascade classification model trained specifically for detecting mouth and eye objects. However, these efforts yielded suboptimal

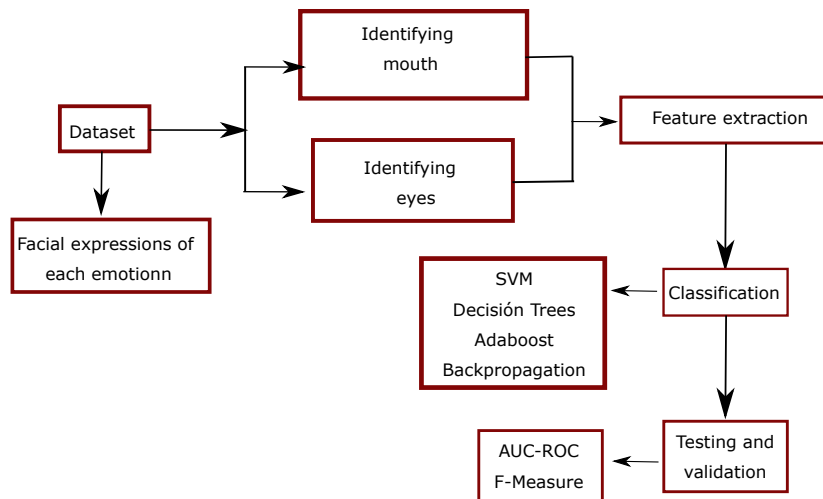


Figure 1. Methodology

Source: own work.

results, as the algorithm frequently misidentified the regions during testing. Consequently, a two-step approach was formulated to accurately identify the regions of interest.

In the first step, the Viola-Jones algorithm is employed to detect faces using cascade classification, providing a foundational framework for subsequent analyses. This algorithm is well-known for its effectiveness in detecting facial features and serves as a reliable starting point for our image analysis.

Then, in the second step, the areas encompassing the eyes and mouth are calculated. This process involves identifying specific points within each region of interest, including the upper-left corner (P_1), upper-right corner (P_2), lower-right corner (P_3), and lower-left corner (P_4). To ensure robustness and accuracy in identifying these key points, an average of 20 images is utilized. The calculation of each P_i point in the new images is performed as follows:

For each point P_i , the coordinates are determined based on the average position of the respective feature across the 20 images. This averaging technique helps to minimize errors and enhances the precision of the feature localization process.

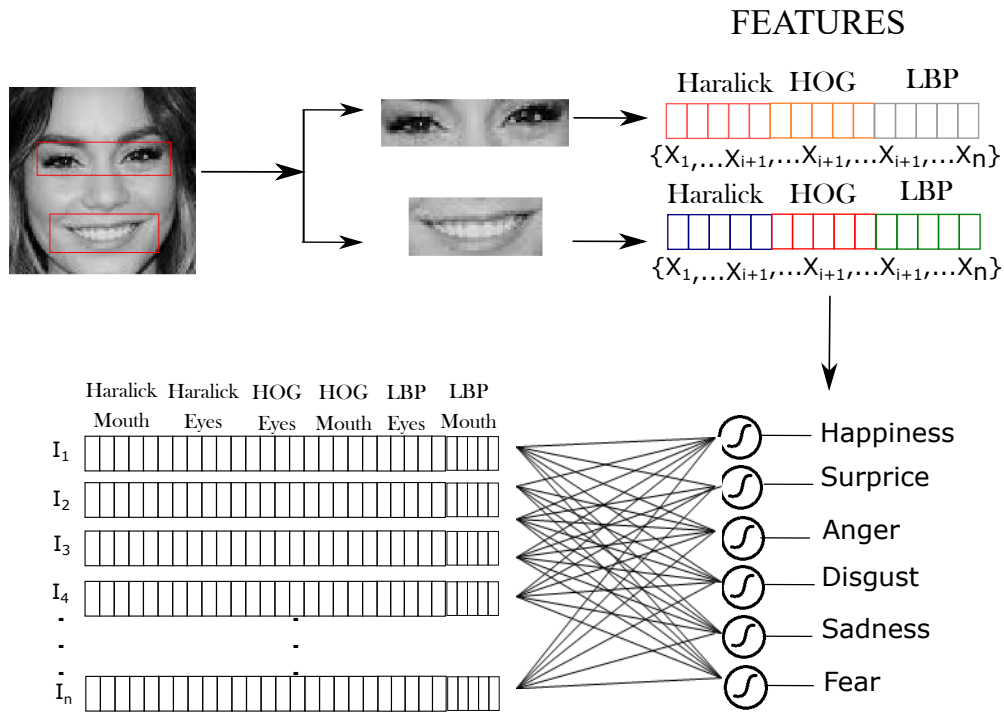


Figure 2. Feature extraction of the proposed methodology

Source: own work.

The improved two-step approach not only enhances the accuracy of the identification of regions of interest but also provides a more reliable foundation for subsequent image analysis tasks. By combining the strengths of the Viola-Jones algorithm with meticulous point calculation, the proposed method aims to overcome the challenges encountered with the initial single-step cascade classification model.

$$P_{ix} = FP_{ix} * NewRes_x \quad (1)$$

$$P_{iy} = FP_{iy} * NewRes_y \quad (2)$$

Here, $NewRes_x$ denotes the resolution along the x axis of the image acquired through the Viola-Jones face recognition algorithm, while $NewRes_y$ denotes the resolution along the y axis of the image, and FP_{ix} and FP_{iy} represent the average factor calculated with 20 images. It is calculated as follows:

$$FP_{ix} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{x_k}{Res(x_k)} \quad (3)$$

$$FP_{iy} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{y_k}{Res(y_k)} \quad (4)$$

Where $Res(x_k)$ and $Res(y_k)$ denote the resolution of the face in the x and y dimensions respectively, with n representing the number of figures, which in our case is set to 20.

Using this approach, the regions of interest for the eyes and mouth were determined, and from each region, a segment was extracted from the original image, resulting in two distinct sets. Subsequently, Haralick textural characteristics were extracted from each set, along with the Histogram of Oriented Gradients (HOG) and Local Binary Patterns (LBP) features, which pertain to shape and texture exclusively.

The extraction of Haralick textural features involved obtaining values for the second angular momentum, contrast, correlation, sum of squares, inverse difference moment, sum average, entropy, variance difference, entropy differences, correlation measures, and correction coefficient. Gradients of ordered histograms were derived using nine bins of size 20×20 with a displacement of 10. HOG proved instrumental in capturing facial expression shapes by leveraging directional gradients and magnitudes, thereby accommodating variations in lighting across images. Additionally, the LBP algorithm facilitated the extraction of shape features by comparing neighboring pixels, complementing the capabilities of HOG and contributing valuable features to the project. The three types of features extracted from the data are illustrated in Figure 2.

To construct the training model, feature vectors from all extracted characteristics were consolidated. Various classifiers, including a Support Vector Machine (SVM), Adaboost, decision trees, backpropagation, and regression, were employed.

For the SVM classification model, a Kernel rbf was utilized with a complexity parameter set to $C = 0,0001$ and gamma set to 1000. This configuration is chosen to achieve optimal classification performance while maintaining computational efficiency.

The comprehensive feature extraction and utilization of multiple classifiers aim to enhance the robustness and accuracy of the proposed model. By combining a variety of features and employing diverse classification techniques, the model is designed to effectively capture and classify intricate

details and variations in facial expressions and features.

RESULTS

Datasets

Two datasets containing spontaneous facial micro-expressions were utilized in the experiments:

SMIC (Spontaneous Micro-Expressions Database):

The SMIC database comprises 164 spontaneous micro-expressions elicited from 16 participants through emotionally evocative movie clips. Data was captured using a high-speed camera at 100 frames per second, resulting in 1909 images with a resolution of 186 x 227 pixels. For this study, five emotions were considered: Joy, Surprise, Disgust, Sadness, and Anger (Li *et al.*, 2018, Li *et al.*, 2013, Pfister *et al.*, 2011).

SAMM (Spontaneous Actions and Micro-Movements): The SAMM dataset consists of 159 spontaneous micro-facial movements elicited through emotional induction from 32 participants representing diverse demographics. The dataset includes individuals from 13 ethnicities, with a mean age between 24 and 33 years (17 men and 16 women). The SAMM dataset contains 3634 images with a resolution of 960 x 650 pixels. Six emotions were analyzed in this study: Joy, Surprise, Anger, Disgust, Sadness, and Fear (Davison *et al.*, 2018, Yap *et al.*, 2020).

Results with both regions

Emotion recognition systems often rely on facial images as input data. While the entire face provides valuable information, research suggests that specific regions, particularly those surrounding the eyes and mouth, hold the most salient features for discerning emotional expressions. This observation stems from the fact that these areas are highly mobile and exhibit distinctive muscle activations associated with various emotions. For instance, the eyes convey emotions through changes in gaze direction, pupil dilation, and the formation of wrinkles around the corners ("crow's feet"). Similarly, the mouth plays a crucial role in expressing happiness through smiles, sadness through frowns, and surprise through open mouth expressions.

To investigate the relative importance of these facial regions in emotion recognition, we conducted experiments focusing on two specific approaches: **a) Combined Eye and Mouth Regions:** This approach leverages information from both the eye and mouth regions, capitalizing on the combined expressive power of these areas. By analyzing features extracted from both regions, we aim to assess the accuracy and effectiveness of emotion recognition when utilizing a comprehensive facial representation.

b) Eye Region Only: This approach focuses solely on the eye region, exploring the hypothesis that the eyes alone may provide sufficient information for accurate emotion recognition. This investigation seeks to determine the extent to which emotions can be effectively discerned without considering features from the mouth region.

By comparing the performance of these two approaches, we can gain valuable insights into the significance of the eye region in emotion recognition. If the eye-only approach achieves comparable accuracy to the combined approach, it suggests that the eyes indeed hold crucial information for discerning emotional states. This finding could have implications for the development of more efficient and targeted emotion recognition systems, potentially requiring less computational resources while maintaining accuracy. Additionally, understanding the specific contributions of the eye region could pave the way for advanced techniques that focus on subtle eye movements and expressions, further enhancing the capabilities of emotion recognition technology.

This section presents a comprehensive evaluation of the proposed method's performance on two distinct datasets, comparing its efficacy with various established classifiers using previously defined performance metrics.

Initially, we present the outcomes achieved using diverse metrics for the classifier exhibiting the highest efficacy. This encompasses the display of confusion matrices generated by the four assessed classifiers.

To ensure consistency and reproducibility, we employed a standardized experimental setup across all evaluations. Data features were normalized to achieve a mean of zero and a standard deviation of one, mitigating the potential influence of scale differences on classifier performance. A 10-fold cross-validation approach was implemented to assess the generalizability of the results and reduce the risk of overfitting. For each classifier, optimal hyperparameters were determined through an exhaustive

grid search, ensuring that each model was fine-tuned for the specific datasets and task.

We present the results obtained using the most effective classifier first, showcasing its performance across various metrics. Additionally, confusion matrices are provided for all four evaluated classifiers, offering deeper insights into their classification behavior and potential misclassifications.

Table 1 displays the performance metrics achieved using an SVM classifier with a Gaussian kernel. The hyperparameters were optimized through cross-validation and grid search, resulting in $C=1000$ and $G=0.005$. The results demonstrate high precision across all emotion classes, indicating the model's ability to accurately identify emotions with minimal false positives.

Figure 3 illustrates the confusion matrices generated by the four classifiers. Along the diagonal, both the number and percentages of accurately classified instances are depicted. Notably, the SVM classifier exhibits the highest performance, closely followed by Logistic Regression. Across all classes, precision values hover near 1. Remarkably, the experiments revealed only 12 errors out of a dataset comprising 3634 instances.

Table 2 presents the performance metrics achieved using an SVM classifier with a Gaussian kernel for emotion recognition. The hyperparameters, C and G , were optimized through a rigorous process of cross-validation and grid search, resulting in values of 1000 and 0.005, respectively. This optimization ensures that the SVM model is fine-tuned to effectively capture the underlying patterns within the data and maximize its discriminative power for emotion classification.

The results displayed in Table 2 highlight the remarkable precision achieved by the SVM clas-

Tabla 1. SVM classification results with the SAMM dataset

Class	TPR	Accuracy	Recall	F-measure	MCC	AUC-ROC
1	0.993	0.994	0.994	0.992	0.998	0.993
2	0.997	0.995	0.996	0.994	0.998	0.993
3	1.000	0.999	0.999	0.999	1.000	0.999
4	0.998	1.000	0.999	0.999	1.000	0.999
5	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6	0.993	0.995	0.994	0.994	0.999	0.992

Source: own work.

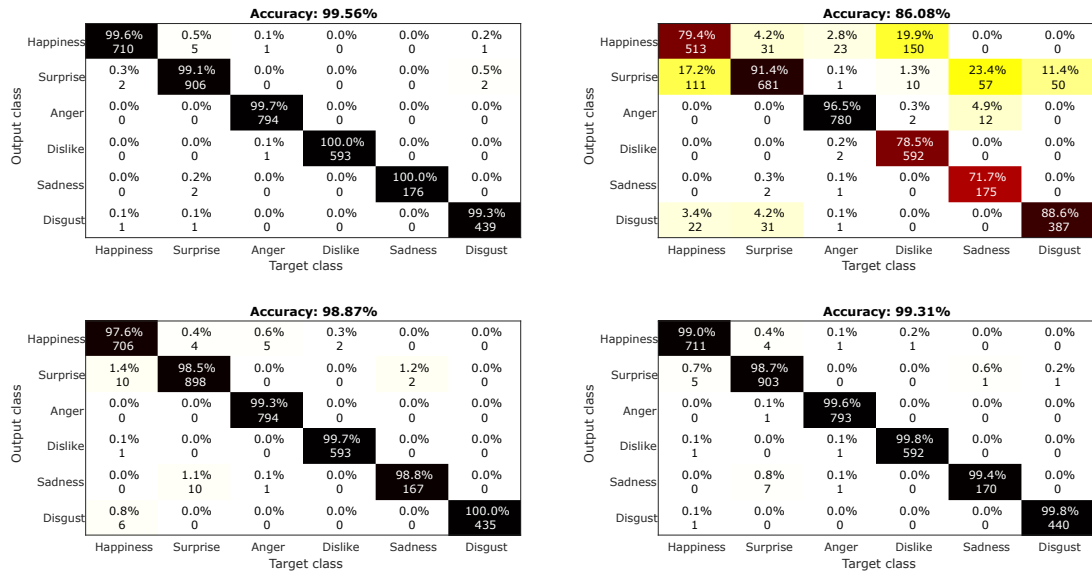


Figure 3. Confusion matrices obtained for the SAMM dataset with eyes and mouth.

Source: Own work.

sifier across all identified emotion classes. This indicates that the model exhibits a low rate of false positive predictions, meaning it rarely misclassifies other emotions as a specific target emotion. This high precision is crucial for real-world applications of emotion recognition, where minimizing false positives is often essential.

Figure 4 presents the confusion matrices for the four evaluated classifiers on Dataset 2, which comprises five distinct emotion classes as previously described. The diagonal elements of each ma-

Tabla 2. SVM classification results with the SMIC dataset

Class	TPR	Accuracy	Recall	F-measure	MCC	AUC-ROC
1	0.980	0.972	0.976	0.968	0.990	0.963
2	0.981	0.984	0.982	0.975	0.994	0.977
4	0.971	0.993	0.982	0.979	0.996	0.978
5	0.991	0.996	0.994	0.993	0.998	0.991
6	0.978	0.965	0.972	0.965	0.990	0.953

Source: own work.

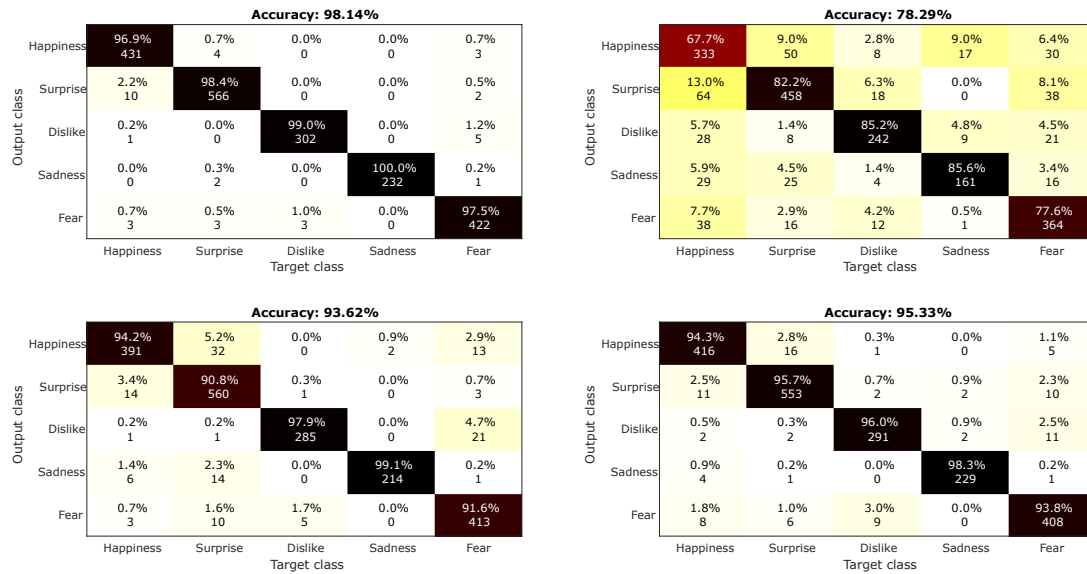


Figure 4. Confusion matrices obtained for the SMIC dataset with eyes and mouth.

Source: own work.

trix represent the number and percentage of correctly classified instances for each emotion category. By analyzing these matrices, we gain valuable insights into the strengths and weaknesses of each classifier and their ability to differentiate between various emotional expressions.

A comparative analysis of the confusion matrices clearly demonstrates that the SVM classifier outperforms the other models, achieving the highest overall accuracy and exhibiting remarkable precision across all emotion classes. This is evident from the diagonal dominance observed in the SVM's confusion matrix, indicating a low rate of misclassifications. Notably, the SVM achieved near-perfect precision, with only 38 errors identified out of a total of 1909 data points in the experiments.

Results with the eye region alone

This section delves into the effectiveness of emotion recognition utilizing solely the eye region as input data. We compare the performance of various classifiers using established metrics, aiming to assess the extent to which emotions can be accurately discerned without information from other facial areas.

Similarly to the previous evaluation, we employed a 10-fold cross-validation approach and grid

search for hyperparameter optimization to ensure robust and reliable results. We present the performance metrics for the best-performing classifier first, followed by a detailed analysis of confusion matrices and box plots to provide a comprehensive understanding of the results.

Table 3 presents the performance metrics achieved by the SVM classifier with a Gaussian kernel ($C=1000, G=0.005$). As observed in the previous experiment, the SVM exhibits high precision across all emotion classes, indicating its ability to accurately identify emotions based solely on features extracted from the eye region.

Figure 5 shows the confusion matrices of the four classifiers. On the diagonal, the number and percentages of well-classified classes are shown. As can be seen, the classifier with the best performance is SVM followed very closely by Logistic Regression. For all classes, the precision is very close to 1. In the experiments, only 39 errors were found out of a set of 3634 data. The results show that with the eye region alone, the accuracy of the classifiers falls somewhat. However, this decline is only significant—dropping from 83 % to 76 % accuracy—with the Bayesian classifier, with no significant effect in the three other 3 classifiers, for which the drop is minimal. With this we can deduce that the recognition of emotions using only the eye region with the proposed method is not severely affected.

Figure 5 displays the confusion matrices for all four evaluated classifiers. The diagonal elements represent the number and percentage of correctly classified instances for each emotion category. Consistent with the overall performance metrics, the SVM demonstrates superior accuracy, followed closely by Logistic Regression. Both classifiers achieve near-perfect precision, with only 39 errors out of

Tabla 3. SVM classification results with the SAMM dataset and with only the eyes region

Class	TPR	Precision	Recall	F-measure	MCC	AUC-ROC
1	0.999	0.991	0.999	0.995	0.993	0.998
2	0.983	0.983	0.983	0.983	0.978	0.993
3	0.998	0.999	0.998	0.998	0.998	0.999
4	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	1.000
5	0.909	0.944	0.909	0.926	0.923	0.991
6	1.000	0.998	1.000	0.999	0.999	1.000

Source: own work.

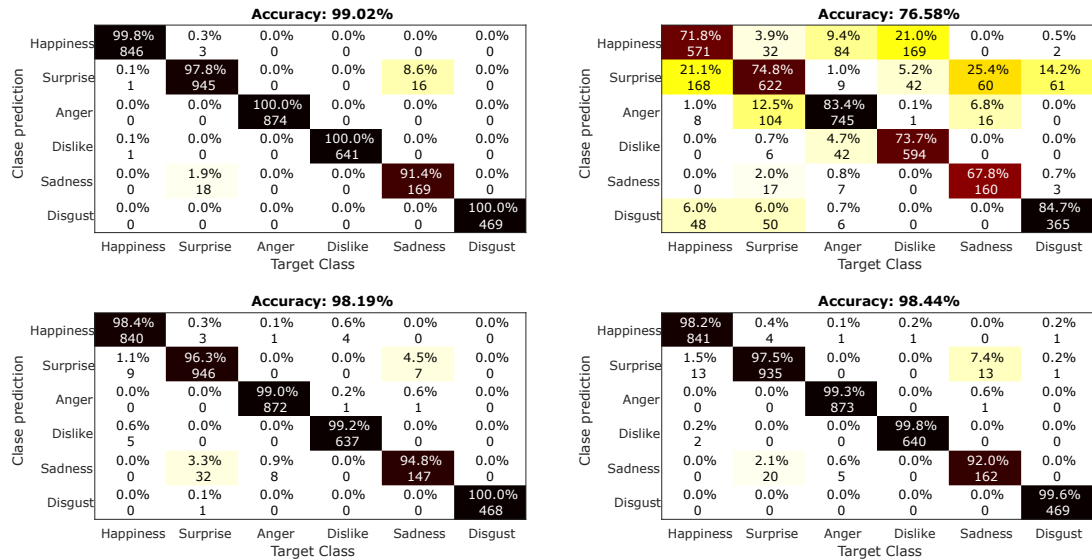


Figure 5. Confusion matrices obtained for the SAMM dataset with eyes and mouth.

Source: own work

3634 data points.

Comparing these results with the previous experiment utilizing both eye and mouth regions, we observe a slight decrease in overall accuracy when relying solely on the eye region. However, this decrease is minimal for the SVM, Logistic Regression, and K-Nearest Neighbors classifiers, suggesting that the eye region provides sufficient information for effective emotion recognition. Notably, the Bayesian classifier experiences a more significant drop in accuracy, highlighting its potential sensitivity to the reduced feature set.

Our findings suggest that the eye region plays a crucial role in emotion recognition, enabling accurate classification even without information from the mouth region. This has significant implications for developing efficient and targeted emotion recognition systems, potentially allowing for reduced computational complexity while maintaining high performance.

Finally, we present the results obtained by applying the proposed method to the SMIC dataset, focusing solely on the eye region for emotion recognition. Table 4 displays the performance metrics achieved using an SVM classifier with a Gaussian kernel, employing the same hyperparameter optimization process as with the SAMM dataset.

The results presented in Table 4 are striking, revealing that the performance achieved using the

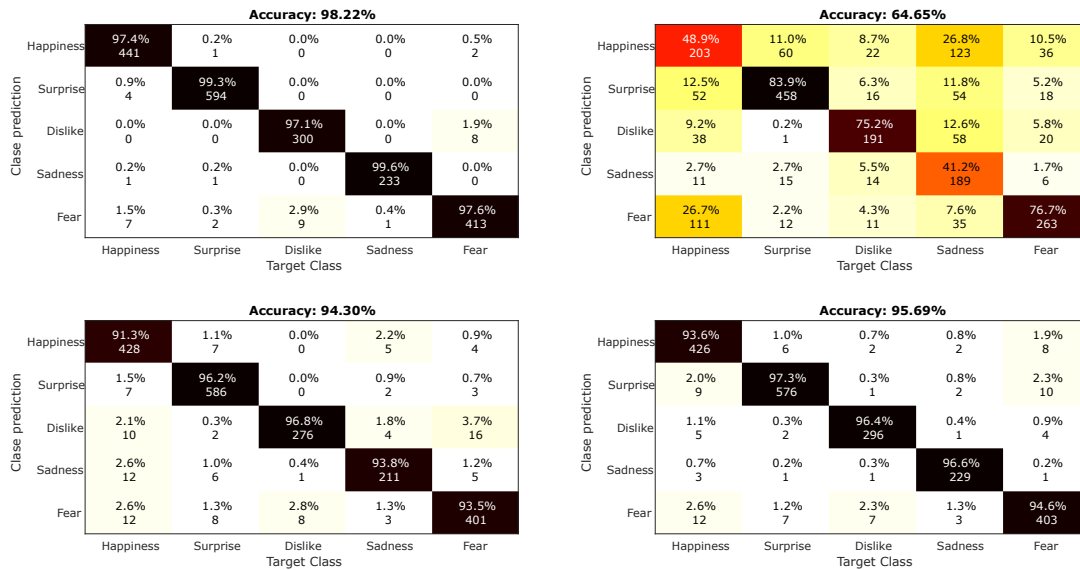


Figure 6. Confusion matrices of different classifiers with SMIC Dataset

Source: own work.

eye region alone surpasses the results obtained when utilizing both the eye and mouth regions in the previous experiment. This finding is particularly significant as the number of extracted features is reduced by half when focusing solely on the eyes, leading to a substantial decrease in computational complexity.

Figure 6 presents the confusion matrices for the four evaluated classifiers on the SMIC dataset, focusing solely on the eye region for emotion recognition. As with previous analyses, the diagonal

Tabla 4. SVM classification results with the SMIC dataset and with only the eyes region

Class	TPR	Accuracy	Recall	F-Measure	MCC	AUCROC
1	0.993	0.974	0.993	0.983	0.979	0.995
2	0.993	0.993	0.993	0.993	0.990	0.996
4	0.974	0.971	0.974	0.972	0.967	0.994
5	0.991	0.996	0.991	0.994	0.993	0.998
6	0.956	0.976	0.956	0.966	0.957	0.985

Source: own work.

elements of each matrix represent the number and percentage of correctly classified instances for each emotion category, providing valuable insights into the classifiers' ability to distinguish between different emotional expressions.

Consistent with the overall performance metrics, the confusion matrices demonstrate that SVM and Logistic Regression achieve the highest accuracy, with near-perfect precision across all emotion classes. Only 36 errors were identified out of a total of 2017 images, highlighting the effectiveness of these classifiers in recognizing emotions based solely on eye region features.

Interestingly, comparing these results with the previous experiment that utilized both eye and mouth regions reveals a noteworthy consideration: focusing solely on the eye region leads to a slight improvement in overall accuracy for the SMIC dataset. This suggests that, for this particular dataset, the eye region provides more discriminative and informative features for emotion recognition than the combined eye and mouth regions.

The observed advantage of the eye-only approach might be attributed to specific characteristics of the SMIC dataset. For instance, the dataset might contain subtle eye expressions that are highly indicative of emotional states, while mouth expressions may be less pronounced or consistent.

The effectiveness of the eye-focused approach could also depend on the specific feature extraction techniques employed. It is possible that the extracted eye features capture more nuanced and relevant information compared to the mouth features, leading to improved performance.

Individual variations in expressiveness and facial muscle activation patterns could also contribute to the observed results. For example, some individuals might exhibit more pronounced emotional cues around the eyes, making the eye region a more reliable source of information for emotion recognition.

The ability to achieve high accuracy with only the eye region demonstrates the potential for developing computationally efficient emotion recognition systems without compromising performance. This has significant implications for real-world applications where computational resources may be limited, such as embedded systems or mobile devices.

The results reinforce the notion that the eye region contains highly discriminative features for emotion recognition, potentially even more so than the mouth region. This highlights the need for further investigation into the specific eye features that contribute most significantly to accurate emo-

tion classification.

The success of the eye-only approach suggests the possibility of developing specialized emotion recognition systems tailored to specific contexts. For instance, systems designed for video conferencing or human-computer interaction could prioritize the eye region, optimizing processing speed and resource allocation.

CONCLUSIONS

This paper introduces a novel algorithm for emotion recognition that leverages advanced feature extraction techniques and autonomous region-of-interest identification. Building upon the foundational face detection capabilities of the Viola-Jones algorithm, our approach strategically targets specific facial regions to optimize the accuracy of emotion classification.

The research presented herein focuses on a comparative analysis of emotion recognition performance when utilizing two distinct facial regions: the eye area and the entire face. By systematically evaluating the efficacy of our algorithm across these regions, we aim to shed light on the relative importance of targeted feature extraction in emotion detection systems.

Our experimental results demonstrate that focusing on specific facial regions, particularly the eye area, can lead to improved emotion recognition accuracy compared to utilizing the entire face. This finding highlights the potential for developing more efficient and targeted emotion detection systems that prioritize informative facial features.

By extracting features from a smaller region of interest, our algorithm reduces computational demands without compromising performance. This has significant implications for real-world applications where computational resources may be limited, such as in embedded systems or mobile devices.

The comparative analysis provides valuable insights into the role of different facial regions in conveying emotional states. Our findings suggest that the eye area plays a crucial role in emotion recognition, potentially even more so than the mouth region for specific datasets.

While our study focused on the eyes and the entire face, future research could explore the role of additional facial areas, such as the forehead and nose, in emotion recognition. Investigating the contributions of these regions could further enhance the accuracy and robustness of emotion detection

systems.

A deeper analysis of individual features within each region, such as eyebrow position, eyelid movement, and lip curvature, is crucial for understanding their specific contributions to the recognition process. This could involve techniques like feature selection or visualization methods to identify the most discriminative features for each emotion.

The expression of emotions exhibits cultural variations, which can influence the effectiveness of emotion recognition systems. Future research should investigate how cultural differences in facial expressions impact recognition accuracy and explore strategies to develop culturally-aware or adaptable models.

REFERENCES

- Al-Hadithi, B. M.; Cena, C. E. G.; León, R. C. & Loor, C. L. (2016). Desarrollo de un Sistema de Iluminación Artificial Inteligente para Cultivos Protegidos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 13(4), 421-429. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2016.07.005>
- Ben Amor, B.; Drira, H.; Berretti, S.; Daoudi, M. & Srivastava, A. (2014). 4-D Facial Expression Recognition by Learning Geometric Deformations. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 44(7-8), 2443-2457. <https://doi.org/10.1109/tcyb.2014.2308091>
- Casas, S.; Portalés, C.; Rueda, S. & Fernández, M. (2017). Simulación de Plataformas Robóticas de Movimiento para Aplicaciones de Realidad Virtual Mediante Filtros Digitales. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 14(4), 455-466. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2017.07.001>
- Cervantes, J.; Taltempa, J.; García-Lamont, F.; Castilla, J. S. R.; Rendon, A. Y. & Jalili, L. D. (2017). Análisis Comparativo de las técnicas utilizadas en un Sistema de Reconocimiento de Hojas de Planta. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 14(1), 104-114. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2016.09.005>
- Chakraborty, A.; Konar, A.; Chakraborty, U. & Chatterjee, A. (2009). Emotion Recognition From Facial Expressions and Its Control Using Fuzzy Logic. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*

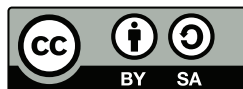
- *Part A: Systems and Humans, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 39(4), 726-743.
<https://doi.org/10.1109/tsmca.2009.2014645>
- Chen, T.; Ju, S.; Yuan, X.; Elhoseny, M.; Ren, F.; Fan, M. & Chen, Z. (2018). Emotion recognition using empirical mode decomposition and approximation entropy. *Computers amp; Electrical Engineering*, 72(7), 383-392. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2018.09.022>
- Davison, A.; Merghani, W. & Yap, M. (2018). Objective Classes for Micro-Facial Expression Recognition. *Journal of Imaging, MDPI AG*, 4(10), 119-121. <https://doi.org/10.3390/jimaging4100119>
- Ekman, P. (1993). Facial expression and emotion. *American Psychologist, American Psychological Association (APA)*, 48(4), 384-392. <https://doi.org/10.1037/0003-066x.48.4.384>
- González, R.; Barrientos, A.; Toapanta, M. & del Cerro, J. (2017). Aplicación de las Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) al diagnóstico clínico de la Enfermedad de Párkinson y el Temblor Esencial. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 14(4), 394-405. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2017.07.005>
- He, X. & Zhang, W. (2018). Emotion recognition by assisted learning with convolutional neural networks. *Neurocomputing*, 291(1), 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.02.073>
- Hossain, M. S. & Muhammad, G. (2019). Emotion recognition using secure edge and cloud computing. *Information Sciences*, 504(1), 589-601. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.07.040>
- Kaur, G.; Sinha, R.; Tiwari, P. K.; Yadav, S. K.; Pandey, P.; Raj, R.; Vashisth, A. & Rakhra, M. (2022). Face mask recognition system using CNN model. *Neuroscience Informatics*, 2(3), 100035. <https://doi.org/10.1016/j.neuri.2021.100035>
- Kurbalija, V.; Ivanović, M.; Radovanović, M.; Geler, Z.; Dai, W. & Zhao, W. (2018). Emotion perception and recognition: An exploration of cultural differences and similarities. *Cognitive Systems Research*, 52(1), 103-116. <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2018.06.009>

- Liang, Z.; Oba, S. & Ishii, S. (2019). An unsupervised EEG decoding system for human emotion recognition. *Neural Networks*, 116(1), 257-268. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2019.04.003>
- Li, X.; Hong, X.; Moilanen, A.; Huang, X.; Pfister, T.; Zhao, G. & Pietikainen, M. (2018). Towards Reading Hidden Emotions: A Comparative Study of Spontaneous Micro-Expression Spotting and Recognition Methods. *IEEE Transactions on Affective Computing, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 9(4), 563-577. <https://doi.org/10.1109/taffc.2017.2667642>
- Li, X.; Pfister, T.; Huang, X.; Zhao, G. & Pietikainen, M. (2013). A Spontaneous Micro-expression Database: Inducement, collection and baseline. *IEEE International Conference and Workshops on Automatic Face and Gesture Recognition (FG), IEEE*, 1(1), 1-6. <https://doi.org/10.1109/fg.2013.6553717>
- Pfister, T.; Li, X.; Zhao, G. & Pietikainen, M. (2011). Recognising spontaneous facial micro-expressions. *2011 International Conference on Computer Vision, IEEE*, 1(1), 1449-1456. <https://doi.org/10.1109/iccv.2011.6126401>
- Prasada Rao, K.; Chandra Sekhara Rao, M. & Hemanth Chowdary, N. (2019). An integrated approach to emotion recognition and gender classification. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 60(1), 339-345. <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2019.03.002>
- Sánchez-Alonso, R. E.; Ortega-Moody, J.; González-Barbosa, J.-J. & Reyes-Morales, G. (2017). Uso de Plataformas para el Desarrollo de Aplicaciones Virtuales en el Modelado de Robot Manipuladores. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 14(3), 279-287. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2017.04.001>
- Santhoshkumar, R. & Geetha, M. K. (2019). Deep Learning Approach for Emotion Recognition from Human Body Movements with Feedforward Deep Convolution Neural Networks. *Procedia Computer Science*, 152(1), 158-165. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.05.038>
- Villán, A. F.; Fernández, R. U. & Tejedor, R. C. (2017). Sistema Automático Para la Detección de Distracción y Somnolencia en Conductores por Medio de Características Visuales Robustas. *Revista*

Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, 14(3), 307-328. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2017.05.001>

Xiaohua, W.; Muzi, P.; Lijuan, P.; Min, H.; Chunhua, J. & Fuji, R. (2019). Two-level attention with two-stage multi-task learning for facial emotion recognition. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 62(1), 217-225. <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2019.05.009>

Yap, C. H.; Kendrick, C. & Yap, M. H. (2020). SAMM Long Videos: A Spontaneous Facial Micro- and Macro-Expressions Dataset. *Automatic Face and Gesture Recognition*, 1(1), 771-776. <https://doi.org/10.1109/fg47880.2020.00029>



Pre-and-post impact fall detection based on support vector machines using inertial and barometric pressure data

Detección de caídas con máquinas de soporte vectorial identificando pre y post impacto con datos inerciales y presión barométrica

Roberth Álvarez Jiménez¹, Edith Pulido Herrera ², Andrés F. Ruiz-Olaya ³, Daniel Alfonso Sierra Bueno ⁴,

Fecha de Recepción: 30 de enero de 2023

Fecha de Aceptación: 18 de abril de 2024

Cómo citar: Roberth Álvarez Jiménez, Edith Pulido Herrera, Andrés F. Ruiz-Olaya, Daniel Alfonso Sierra Bueno (2022). Pre-and-post impact fall detection based on support vector machines using inertial and barometric pressure data. *Tecnura*, 28(78), 34-52. <https://doi.org/10.14483/22487638.22066>

ABSTRACT

Objective: This paper presents a novel real-time algorithm for fall detection, which contextualizes falls by identifying activities occurring both pre- and post-impact utilizing machine learning techniques and wearable sensors.

Methodology: The activities selected to contextualize fall events included standing, lying, walking, running, climbing stairs, and using the elevator. Data were collected using an inertial measurement unit and a barometric altimeter positioned on the participants' lower backs. Thirteen healthy subjects were observed performing the activities and fall events were recorded from five healthy subjects. The proposed algorithm combines thresholding and cascade support vector machines (SVMs), whose robustness is enhanced by a verification process of the subject's posture aimed at determining the occurrence of the fall more accurately.

Results: The performance of the algorithm was evaluated in terms of the hit rate (HT) both offline and in real-time. From the activities studied, stairs climbing proved to be the most challenging to detect, with an offline HT of 85 % and an online HT of 76 %. The overall offline performance was superior, with an HT of 96 %, compared to the performance achieved online, an HT of 91 %; in both cases the fall detection HT was 100 %.

Conclusions: The algorithm can be used to recognize fall events occurring to any user, as it has the advantage of not needing prior adaptation due to the nonlinear nature of the SVMs. The cascade SVMs allow for using small sets of variables,

¹Magister, Ingeniero Electrónico. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia
Email: roberth.alvarez@correo.uis.edu.co

²Doctora Europea en Ingeniería, Especialista Universitaria en Comunicaciones Móviles, Ingeniera Electricista. Profesora Titular, Universidad El Bosque. Bucaramanga, Colombia.
Email: epulidoh@unbosque.edu.co; epulidoh@unal.edu.co

³Doctor, Ingeniero Electrónico. Profesor Asociado, Universidad Antonio Nariño. Bogotá
Email: andresru@uan.edu.co

⁴Doctor en Ingeniería Biomédica, Magister en Ingeniería Eléctrica, Ingeniero Eléctrico y Electrónico. Profesor Titular, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
Email: dasierra@uis.edu.co

leading to low computational cost and a suitable real-time implementation. These features, in addition to the posture verification process, make our algorithm suitable for activity recognition in non-laboratory environments.

Financing: This research was partly funded by the Colombian Administrative Department of Science, Technology, and Innovation (COLCIENCIAS) and the Universidad Industrial de Santander (UIS), grant FP44842-507-2014, project 1817; and by the Universidad El Bosque under grant PCI2019-10784.

Keywords: support vector machines, activity recognition, fall detection, wearable inertial sensors, pre-and-post impact.

RESUMEN

Objetivo: Este artículo presenta un algoritmo para la detección de caídas en tiempo real, el cual se contextualiza mediante el reconocimiento de las actividades previas y posteriores al impacto de la caída, utilizando técnicas de aprendizaje automático y sensores llevables.

Metodología: Las actividades estudiadas para la contextualización de la caída incluyen estar de pie, caminar, correr, subir o bajar en escaleras, y desplazarse en ascensor. La recolección de datos se hizo utilizando una unidad de medición inercial y un barómetro ubicados en la parte baja de la espalda de los participantes. Trece voluntarios sanos fueron observados para el registro de actividades y cinco voluntarios sanos para el registro de las caídas. El algoritmo propuesto combina máquinas de vectores de soporte (SVM) en cascada y umbrales, cuya robustez es mejorada con un proceso de verificación de la postura del sujeto para determinar de manera más precisa la ocurrencia de la caída.

Resultados: El rendimiento del algoritmo fue evaluado en términos de la tasa de aciertos (TA) tanto *offline* como en tiempo real de detección de las actividades estudiadas. Subir o bajar escaleras representó la mayor dificultad de detección, con una TA del 85 % *offline* y del 76 % *online*. El rendimiento global *offline* fue superior, con una TA del 96 %, comparado con el rendimiento alcanzado *online*, representado por una TA del 91 %; en ambos casos la TA de detección de caídas fue del 100 %.

Conclusiones: El algoritmo puede utilizarse para reconocer eventos en cualquier usuario, es decir, tiene la ventaja de no requerir adaptación previa, dada la naturaleza no lineal de las SVM. Las SVM en cascada permiten el uso de pequeños conjuntos de variables, lo que genera un bajo costo computacional y una implementación adecuada en tiempo real. Estas características, además de la robustez incrementada con un proceso de verificación de postura con excelentes resultados en la detección de la caída, permiten que nuestro algoritmo sea adecuado para el reconocimiento de actividades en entornos fuera del laboratorio.

Financiamiento: Esta investigación fue parcialmente financiada por Colciencias, actualmente Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación y la Universidad Industrial de Santander con el contrato FP44842-507-2014, proyecto 1817; y la Universidad El Bosque con el proyecto PCI2019-10784.

Palabras clave: máquinas de soporte vectorial, reconocimiento de actividades, detección de caídas, sensores llevables inerciales, pre-post impacto.

INTRODUCTION

Falls are the second leading cause of death due to unintentional injuries in older (aged over 65) populations (James *et al.*, 2019). Each year, approximately 28–35 % of individuals aged 65 experience falls, while the figure rises to 32–42 % among those aged over 65 (World Health Organization, 2007).

Even non-fatal falls can result in injuries such as fractures or moderate to severe traumatic brain injuries, significantly impacting individuals' well-being. Long lies following a fall can seriously affect the physical and psychological condition of the elderly. For instance, 47 % of older adults are unable to get up after a fall (Tinetti *et al.*, 1993), and some studies indicate that half of those who remain on the floor for more than an hour might die within six months (Wild *et al.*, 1981). Periodic assessments of daily physical activities would facilitate ongoing objective monitoring to identify fall risks. Extensive research has been conducted to assist individuals during fall incidents. However, there remain unresolved issues related to accurately detecting falls or excessively yielding false alarms that can overwhelm caretakers and caregivers alike. In both scenarios, confidence in the technology may wane, affecting its acceptance among final users (Igual *et al.*, 2013).

Fall detection systems utilize sensor technology such as acoustic, floor pressure, near field imaging, vision, ultrasonic, radar, barometers, or wearable inertial sensors (Nooruddin *et al.*, 2021). Miniaturized sensors like wearable barometers or inertial sensors have recently gained significant attention. Their cost and portability offer the opportunity to monitor potential fallers on a daily basis, i.e., outside clinical settings. These sensors can be placed on various parts of the body, including the head, chest, wrist, trunk, feet, ankle, among others, allowing valuable information about falls and motion activities to be gathered (Alvarez *et al.*, 2017; Alvarez, 2017; Patelet *et al.*, 2020). This range of possibilities allows for comparing the performance of the various approaches regarding sensor location (Kangas, 2008). Nonetheless, studies have shown that relying on only one location may be sufficient to recognize human locomotion-related activities. In this respect, when using inertial sensors individually, the lower back emerges as the most common body location because the center of mass of the human body is in this area (Inman *et al.*, 2006), which facilitates the recognition of human locomotion related activities in free-living environments.

Data processing algorithms include the analysis of parameters such as the accelerations or angular velocities in the axes of movement of the human body, changes of height during falls, or vertical velocity, among others (Zhang *et al.*, 2006; Sabatini *et al.*, 2016). These approaches are based on analytic and learning techniques (Noury *et al.*, 2007). Analytic methods consist of merging data from different sensor technologies to which thresholding methods are applied. Accelerations thresholds are the most common criteria associated with fall events and motion-related activities such as walking

or jumping. In order to process such information, machine learning is commonly utilized through techniques such as support vector machines (SVM), k-nearest neighbors (K-NN), and deep neural networks (Yu *et al.*, 2020).

Most algorithms commonly discriminate falls from non-falls or falls from motion activities (e.g., walking, running). Yet, few studies have addressed fall detection by contextualizing the fall event. To bridge this gap, one strategy could be to identify pre- and post-impact fall activities (Lopez-Yunez *et al.*, 2014; Pierleoni *et al.*, 2015). This approach can help in properly managing the fall event to avoid harmful consequences such as prolonged immobility. By contextualizing the event, we can regard scenarios that involve changes between postures and activities, e.g., sitting to standing or walking to running. Importantly, when discriminating falls from other activities, systems can erroneously associate activities that present similar signal patterns, in short periods, with falls, e.g., walking upstairs, downstairs, or running. These misidentifications can increase the rate of false positives. To address this issue and drawing inspiration from the work of Sorvala *et al.* (2012), we propose a hybrid algorithm for fall detection that contextualizes the event through the recognition of pre-impact and post-impact fall activities using inertial and pressure data. The activities are defined considering typical motion scenarios observed in the daily activities of common users. The algorithm combines thresholding and two cascade support vector machines (SVMs). Moreover, to increase the robustness of the fall detection, a verification process consisting of three stages is included: detection of a possible fall, verification of the previous activity, and assessment of the current posture to determine whether to trigger a fall alarm.

MOTION ACTIVITIES AND FALL CHARACTERIZATION

Falls can occur in scenarios where individuals intentionally or unintentionally change their body position, for instance, going to bed or losing balance during a walk. A fall event can be characterized as having four stages: start, impact, post-impact, and posture (Pierleoni *et al.*, 2015). These stages can be well interpreted from the vertical acceleration pattern when using a body-waist accelerometer. As illustrated in Figure 1 and Figure 2, the acceleration exhibits significant variations in its values, reaching sudden high magnitudes when the impact occurs. Subsequently, in the post-impact and posture stages, the magnitudes may vary according to the individual's recovery.

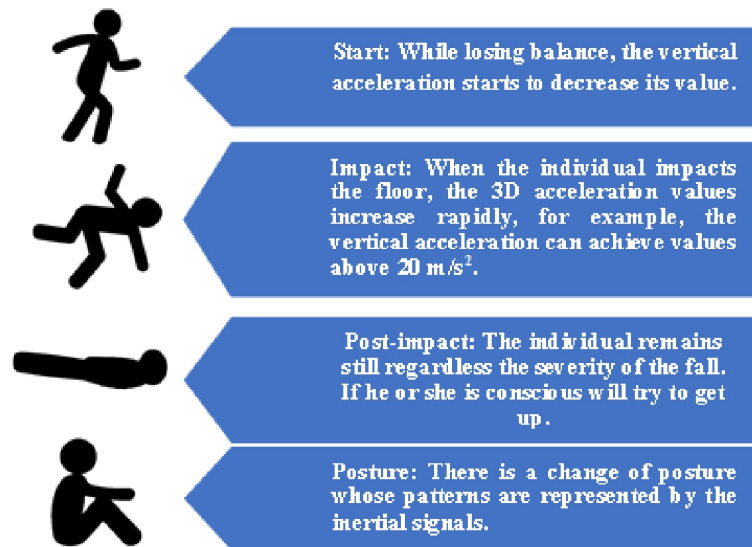


Figure 1. Characterized phases of a fall.

Source: Adapted from (Pierleoni *et al.*, 2015).

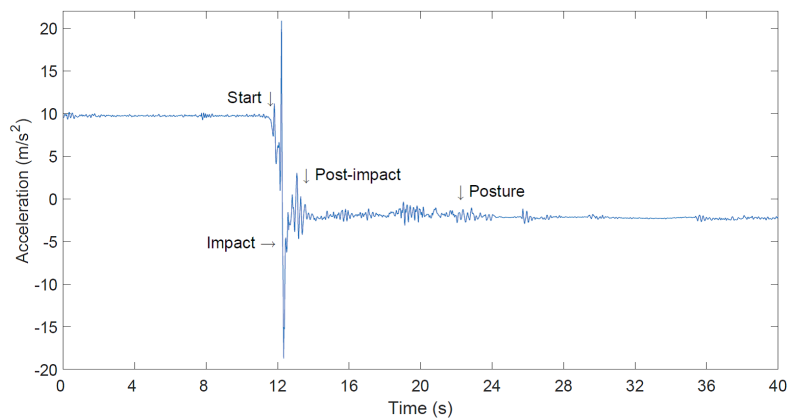


Figure 2. Vertical acceleration pattern during a fall.)

Source: Authors' elaboration.

Considering a real-life scenario, we choose a set of activities that may occur before and after a fall event. Specifically, we included postures and motion activities such as standing, walking, running, ascending and descending stairs, and using the elevator. To characterize these activities, we employed motion and height data. Figure 3a shows the patterns of vertical acceleration and pressure of a

user performing various activities. As observed, running and walking upstairs and downstairs present high peaks of the vertical acceleration, while pressure data hardly showed identifiable patterns for most activities. Nonetheless, since pressure data allows for identifying changes in height, it can be useful in identifying climbing stairs and using an elevator, as is shown in Figure 3b.

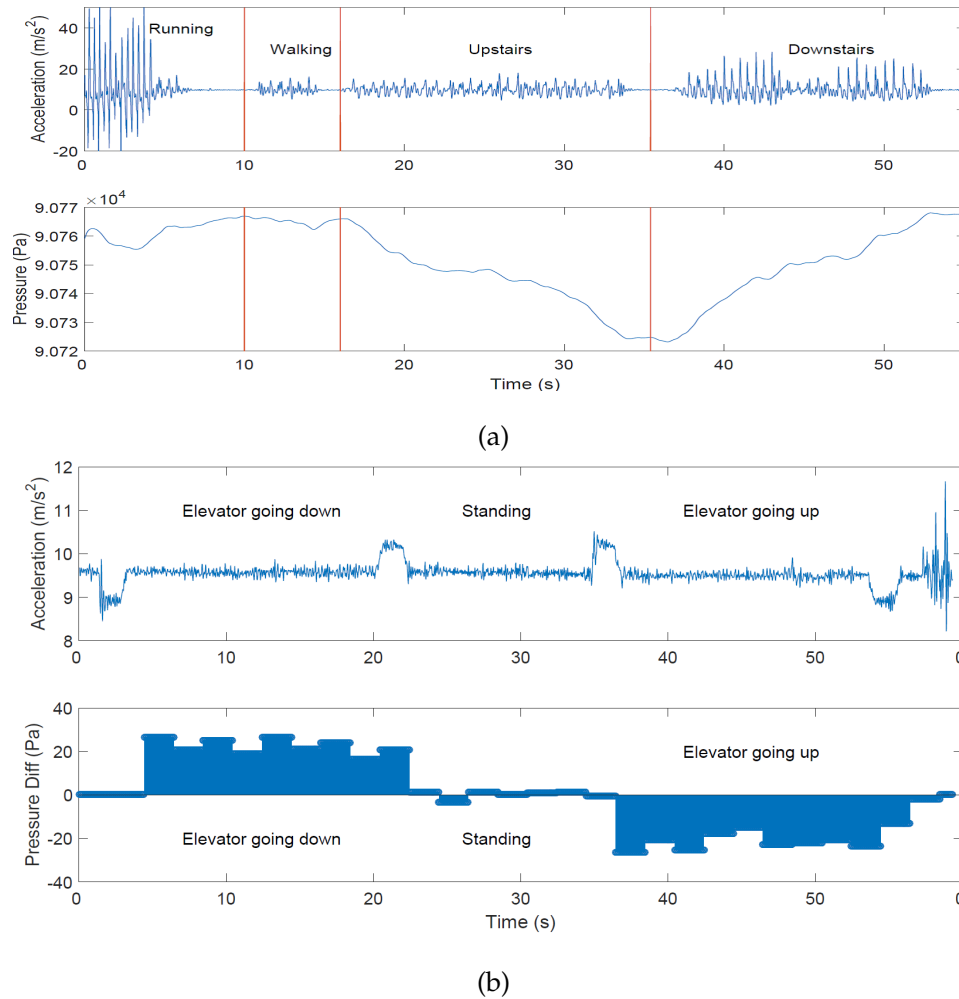


Figure 3. a) Vertical acceleration and pressure signals during the following activities: walking, running, and walking upstairs or downstairs. b) Vertical acceleration and pressure signals for walking and walking upstairs or downstairs

Source: Authors' elaboration.

METHODOLOGY

Participants and equipment setup

Falls and activities signals were collected from 13 volunteers (8 women, 5 men, aged 20 to 25 years). The university's ethical committee approved the experiment protocol and all participants signed the informed consent form. Motion data were collected using an embedded prototype (Bravo, 2017) compounded of a Beagle Bone Black Board, which processed data from an IMU-I manufactured by Xsens and the Pololu-brand Alt-IMU V4. Sensors were placed on participants' lower back (see Figure 4a). The IMU measures acceleration and angular velocity in 3D with a sample frequency $f_s = 50\text{Hz}$. The Alt-IMU measures the pressure with a sample frequency $f_s = 25\text{Hz}$. Another setup was designed to collect fall data, involving the attachment of the IMU to a waist-level bar (see Figure 4b) (Kumar, 2013).



Figure 4. a) System located at the lower back for data acquisition. b) IMU placement on a waist-level bar.

Source: Authors' elaboration.

Data sets

Offline testing protocol: A first protocol was designed for the purpose of training the two support vector machines intended to classify falls from other activities, as described in the *Algorithm Overview* section. Accordingly, the following set of tasks was defined: (1) *straight-line walk I*: participants were asked to walk 30 steps in a straight line at a self-paced speed; (2) *straight line walk II*: participants were asked to run 30 steps; (3) *walking up and down the stairs*: participants were asked to ascend 15 steps and then descend 15 steps; this task was repeated four times; (4) *sit/standing*: participants were instructed to sit, wait for about 3 seconds, and then stand up; this tas

Fall data were collected through two experiments. The first experiment consisted in dropping a bar (see Figure 4b) onto a mattress ten times. In the second experiment, 5 participants were asked to fall forward onto a mattress twice (see Figure 5).



Figure 5. A sequence of a fall event test conducted by a participant.

Source: Authors' elaboration.

Real-time testing protocol: This protocol was designed to conduct real-time experiments that replicate common scenarios for activity and fall detection. Participants performed a first set of activities as follows: (1) *activities:* they began with a 15-meter walk, paused in front of stairs for about 5 seconds, proceeded to climb the stairs (about 3 meters), then walk downstairs, and waited for about 5s. Next, they turned around and repeated the same movements, in addition of running in the last segment of the path; and (2) *elevator use:* a participant was asked to ride the elevator up and down a few times. The second set of tests was designed to evaluate the performance of the fall detection algorithm. As such, participants simulated falls in various scenarios by performing the following tasks: *test 1:* the participant was instructed to first to stand, then fall onto a mattress, and remain lying down for a few seconds (see Figure 5); *test 2:* the participant walked to the mattress, fell onto it, and remained lying down until he was instructed to sit; *test 3:* the participant walked to the mattress, then fell onto it, got up, and resumed walking.

Test 1 and test 2 simulate situations where the algorithm is expected to detect a fall, considering post-impact conditions, as the subject remains on the floor. Test 3 replicates a situation where the subject falls but manages to return to a normal position and continue moving.

Feature extraction

A feature extraction process was carried out using data collected during the offline protocol to identify the best features in the classification process. Time-domain features were extracted every 2 seconds from the raw acceleration and angular velocity collected with a frequency of 50 Hz, and the pressure data collected with a frequency of 25Hz. The pressure data were low-pass filtered using a

second-order Butterworth filter with a 0.3Hz cut-off frequency. Features derived from the acceleration, angular velocity in 3D, and their magnitudes were the maximum, the minimum, the mean, the standard deviation, the variance, and the root mean square. The differential pressure was a feature derived from the pressure data. As such, 170 features were obtained, which underwent a forward selection process using Matlab. As a result, the features that presented the best separability for falls and “other activities-1” (activities with displacement) were the minimum and the maximum of the lateral angular velocity (ω_y); and the variance of the magnitude of the acceleration $var(a_{mag})$. For walking and “other activities-2” (activities with higher peaks, i.e., running or walking upstairs and downstairs), the features that presented the better performance were the variance of the acceleration magnitude $var(a_{mag})$; and the variance of the forward acceleration $var(a_x)$. The final set of features was used to train and validate a cascade of two support vector machines, as will be described in the following sections.

ALGORITHM OVERVIEW

The algorithm combines heuristics knowledge and learning techniques to classify falls and activities. Namely, the algorithm is based on thresholding methods, i.e., Decision Making I and Decision Making II; and two support vector machines (SVMs) in cascade, SVM-1 and SVM-2 (see Figure 6). Both classifiers were trained with the features previously obtained, validated using 10-fold cross-validation, and implemented using the kernel RBF. Empirical observations were considered to design the algorithm. Specifically, standing, lying, and using the elevator can be detected by evaluating the thresholds of the vertical acceleration (a_v), as well as the differential pressure (P_{diff}); (Decision Making I). We also observed that running exhibits high acceleration peaks similar to falling, which can result in misclassifications of these activities. Hence, the two cascade SVM classifiers aim to reduce such errors. When high peaks of acceleration are identified, priority is given to detecting a fall event, i.e., the first classifier (SVM-1) discriminates between a “possible fall” and “other activities-1.” In the latter case, the second classifier (SVM-2) is executed to distinguish walking from “other activities-2” (i.e., running and walking upstairs and downstairs). If “other activities-2” is recognized, the thresholding method “Decision Making II” classifies running, walking upstairs and downstairs, and possible falls. Finally, when a “possible fall” has been detected, the post-impact verification is conducted.

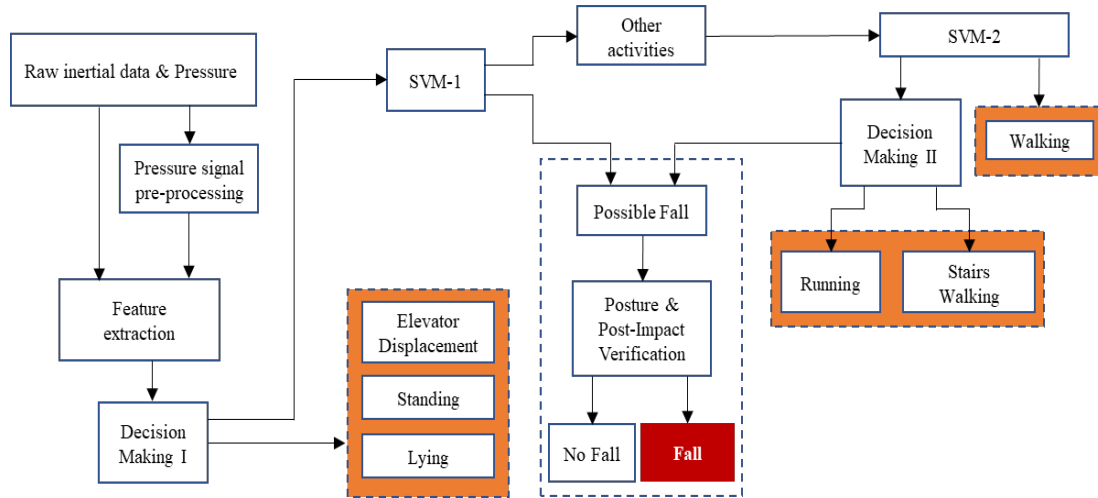


Figure 6. Algorithm to identify fall events and related motion activities prior-to and post the impact event.

Source: Authors' elaboration.

Decision making I and support vector machine I (SVM-1): this stage discriminates the activities that do not involve stepping, i.e., standing, lying, and using the elevator. To define a non-movement scenario, the threshold of the $var(a_{mag})$ should be less than $1m/s^2$. Lying and standing can be detected by evaluating the mean of the vertical acceleration (μ_{av}), whereas to determine if the user is riding an elevator, the threshold of (P_{diff}) is $>7.5Pa/s$ (see Figure 7). In case of movement, i.e., $var(a_x) > 1m/s^2$, the first classifier is executed (SVM-1). The inputs of SVM-1 are the minimum and the maximum of (ω_y), and the $var(a_{mag})$, whereas the outputs are “possible fall” and “other activities-1.” When the former is identified, the “Posture Verification” process takes place. Specifically, a fall is detected when the user remains motionless for at least 10 seconds without changing their posture.

Decision making II and support vector machine 2 (SVM-2): this stage recognizes motion activities that involve stepping, i.e., walking, running, and walking upstairs and downstairs, as well as to detect possible falls (see Figure 8). More specifically, SVM-2, whose inputs are $var(a_{mag})$, and $var(a_x)$, discriminates between walking and “other activities-2.” When SVM-2 detects other activities, the “Decision making II” process is executed. Decision-making II recognizes running, upstairs and downstairs, and possible falls. Empirical knowledge is leveraged by applying thresholding to P_{diff} , and μ_{av} . For instance, according to our observations, in the walking-stairs activity, the vertical displacement could be distinguished when P_{diff} is over 4 kPa/s. If P_{diff} is positive, the user is descending

the stairs; otherwise, the user is ascending. As in the previous stage, the posture verification process is also executed.

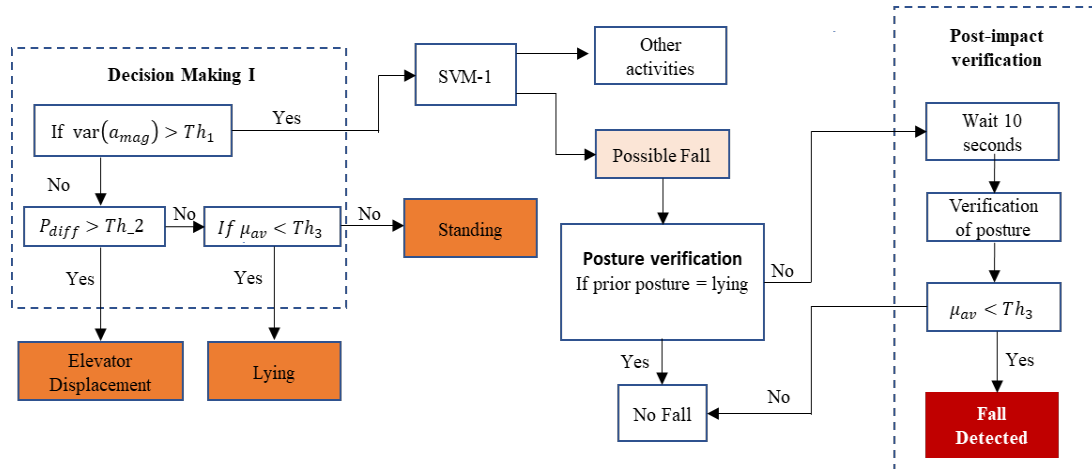


Figure 7. Scheme of the recognition of non-motion activities using thresholding and possible falls using the classifier SVM-1.

Source: Authors' elaboration.

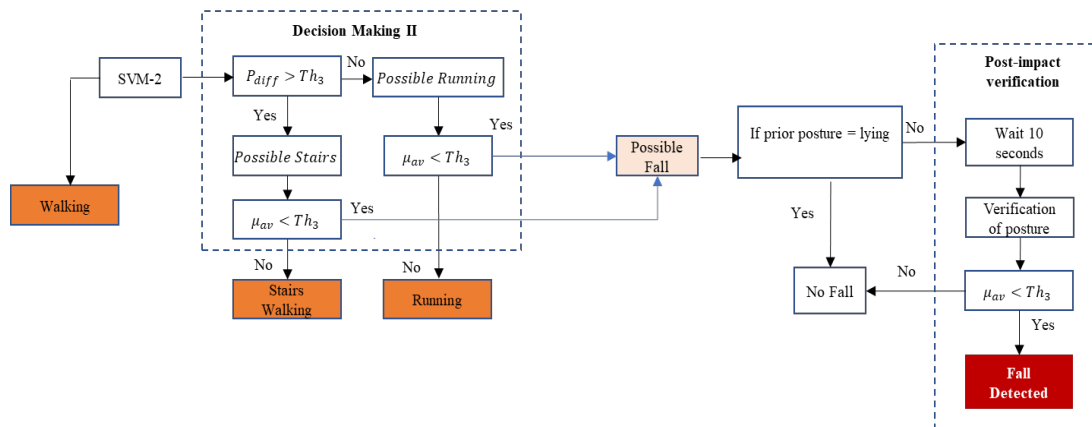


Figure 8. Scheme of the recognition of motion activities using thresholding and possible falls using the classifier SVM-2.

Source: Authors' elaboration.

Evaluation

The assessment of the performance of the classifiers was conducted in terms of sensitivity, specificity, and accuracy, as follows:

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP + FN} \times 100 \quad (1)$$

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP} \times 100 \quad (2)$$

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \times 100 \quad (3)$$

where TP is the number of the instances correctly classified as “possible fall” (SVM-1) or walking (SMV-2); TN, is the number of instances correctly classified as “other activities-1” or “other activities-2” by SVM-1 or SMV-2, respectively; FP corresponds to the number of instances incorrectly classified as “possible fall” or walking; and FN is the number of instances incorrectly classified as “other activities-1” or “other activities-2,” by SVM-1 or SMV-2, respectively. The performance of the entire algorithm was evaluated by calculating the hit rate of the recognition for each activity.

RESULTS

Offline results: The confusion matrix of SVM-1 indicates a low performance of this classifier with an approximate 50 % of misclassifications of “possible fall,” whereas “other activities-1” (see Table 1) presented a good rate of correct classifications. By contrast, the confusion matrix of SVM-2 indicates a good performance for both instances. Namely, 192 “walking” and 184 “other activities-2” instances were correctly identified, whereas 15 “possible fall” and 14 “other activities-2” were misclassified (see table 2). As seen in Table 3, SVM-1 exhibited low performance regarding sensitivity (77.41 %) and specificity (78.86 %).

Table 1. Confusion matrix of the SVM-1 classifier.

		Recognized	
		Possible Fall	Other activities-1
Expected	Possible Fall	48	14
	Other activities-1	41	153

Table 2. Confusion matrix of the SVM-2 classifier.

		Recognized	
		Walking	Running/Stairs
Expected	Walking	192	15
	Other activities-2	14	184

Table 3. Offline recognition performance of the classifiers SVM-1 and SVM-2.

Output	Accuracy(%)	Sensitivity(%)	Specificity (%)
Possible Fall – Other activities -1	89.21	77.41	78.86
Walking – Other activities -2	90.59	92.75	92.92

During the offline testing, a routine was created by concatenating data collected in the offline protocol, including falls, elevator displacement, and activities such as standing, walking, running, and walking upstairs and downstairs. Figure 9 illustrates an example of this routine, showcasing the recognition activities and the vertical acceleration patterns associated with each activity. This sequence of events was obtained by randomly concatenating the activities to test the algorithm’s ability to adapt to sudden changes between them. Specifically, the signal represented the activities of study separated by signal blocks with the following sequence: standing, walking, walking upstairs or downstairs, running, riding an elevator, and falls. As expected, the magnitude of the acceleration while walking is low compared to running or walking upstairs or downstairs. It can also be observed that falls can have similar peak values to running, although they last for a very short time.

The performance of the entire algorithm was assessed by calculating the hit-rate percentage, as indicated in Table 4. Walking, standing, riding the elevator, and falls did not exhibit misclassifications. The 15% of misidentifications of the walking upstairs and downstairs activity might be caused by the body movement changes during ascent and descent stairs, which could impact the selected thresholds of the P_{diff} . Nonetheless, the performance of the algorithm indicates that using thresholding in combination with cascade SVM is a robust method with, not misclassifications of falls.

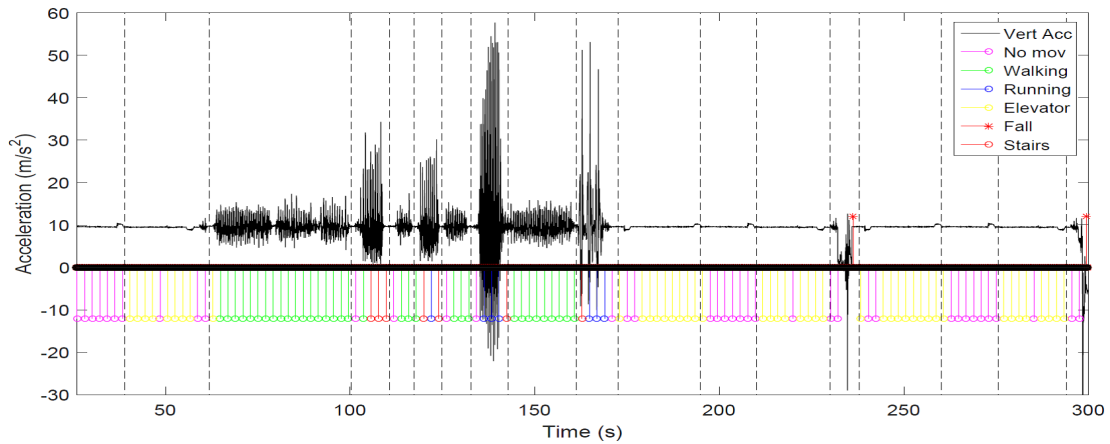


Figure 9. Offline activity recognition and fall detection based on vertical acceleration. This includes elevator displacement, standing, walking, running, using the stairs, and fall events.

Source: Authors' elaboration.

Table 4. Hit rate for the activity recognition and fall detection algorithm (offline)

Activity	Hit rate (%)
Lying	100
Standing	100
Elevator	100
Walking	96.60
Running	92
Walking- Stairs	85
Fall	100
Algorithm	96

Source: Authors elaboration.

Real-time results: Various tests were conducted by five participants: two participants took part in the training stage, whereas three new participants carried out the real-time protocol. Thus, we were able to assess the performance of the algorithm with a new group of subjects. We considered real-world scenarios such as the fall recognition examples illustrated in Figure 10. In the first case (see Figure

10a), the user falls (the vertical acceleration achieved a value of 20 m/s^2) after performing a short walk; and then, he lies on the ground (the vertical acceleration was approximately equal to 0 m/s^2). The system detects a fall after the verification process. It confirms that the person did not change its body position after a while, i.e., the person remained on the floor. In the second example (see Figure 10b), the user walks, then stops for a few seconds, and falls ($t = 24 \text{ s}$); since the subject remained still, the fall was detected.

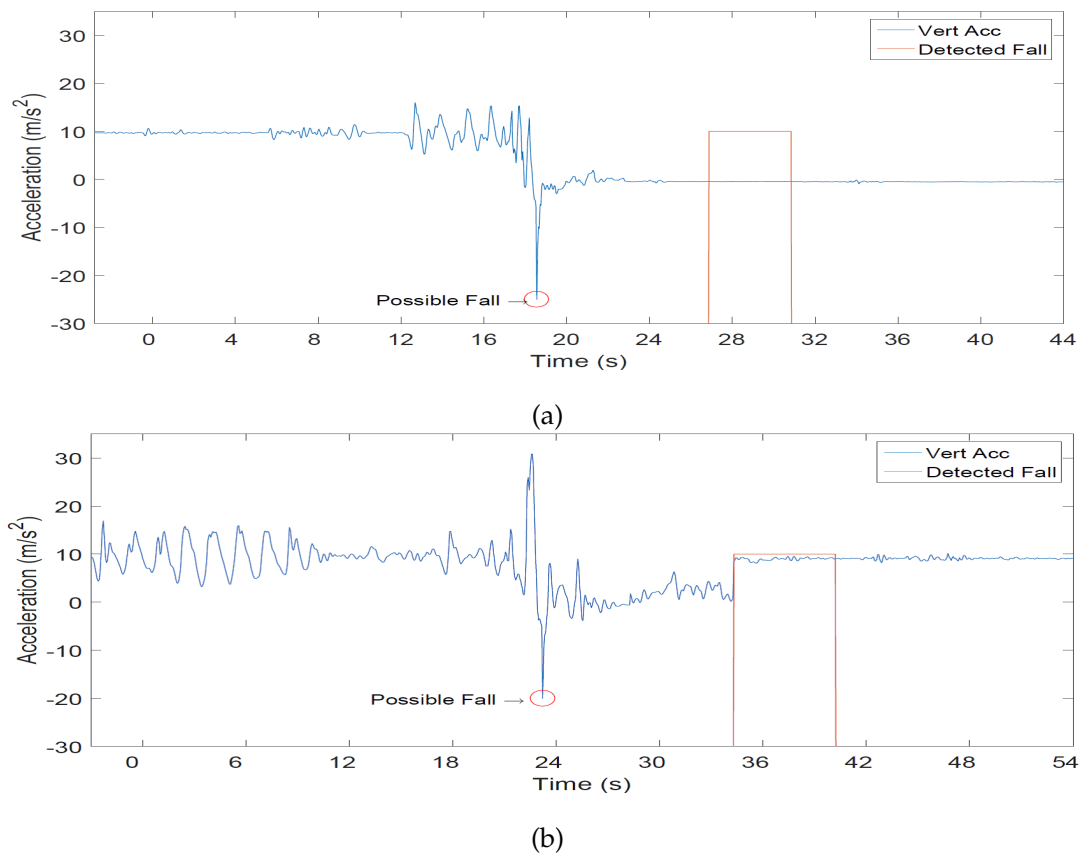


Figure 10. a) Fall detection in real time while the user was walking. b) Fall detection after the user made a short stop during a walk tries to recover and remains still.

Source: Authors elaboration

The algorithm can identify the pattern of falls and contextualize the events according to the thresholding methods. Interestingly, falls of all participants were correctly classified (see table 5, which shows the potential of the algorithm in real-time.

Table 5. Hit rate for the activity recognition and fall detection algorithm (Real-Time).

Activity	Hit rate (%)
Lying	100
Standing	100
Elevator	100
Walking	91
Running	87.5
Walking-Stairs	76.5
Fall	100
Algorithm	91

Source: Authors elaboration

The performance of the algorithm in real-time was lower than the performance obtained offline, as shown in Table 4 and Table 5. The hit rate of the activity recognition decreased when performing movement activities, i.e., walking (from 96.60 % to 91 %), running (from 92 % to 87.5 %), and using the stairs (from 85 % to 76.5 %), which can be the most challenging movement. These results are consistent since a new group of participants also conducted real-time testing. Moreover, the algorithm's performance might be affected by additional factors, including participants' speed during the tests, or environmental changes. Despite these aspects, the algorithm was able to correctly recognize in real-time the "no-movement activities" (see Table 5), while there were no falls' misrecognitions. Conversely, walking upstairs and downstairs remained challenging with a hit rate of detection of around 23 %. The main limitations of the present study include that the results were obtained from a small data set, tests were conducted with young subjects in controlled conditions, and only forward falls were studied. However, the results are promising considering that real-time tests were conducted with subjects who did not participate in the training tests.

CONCLUSION

This paper presented a real-time algorithm for fall detection, which contextualizes fall events by recognizing the activities performed before and after the incident. These activities were determined

using a wearable inertial measurement unit and a barometric sensor. The algorithm combined thresholding and SVMs, which allowed for extending its functionality to any user without prior training. We defined a three-stage detection method based on motion activities recognition to increase the algorithm's robustness. Namely, the user's previous and subsequent activity are analyzed when detecting a possible fall alarm. By doing this, it is only necessary to store information about the most recent previous activity, making the memory requirement very low. As such, the algorithm did not exhibit misclassifications of falls in the real-time performance tests, whereas the activity recognition achieved a hit rate equal to 91 %. Future research should include validating the proposed algorithm with vulnerable populations in natural conditions, modeling various types of falls, and comparing it with other machine learning techniques.

FUNDING

This research was partly funded by the Colombian Administrative Department of Science, Technology, and Innovation (COLCIENCIAS) and the Universidad Industrial de Santander (UIS), grant FP44842-507-2014, project 1817; and the Universidad El Bosque, grant PCI2019-10784.

ACKNOWLEDGMENTS

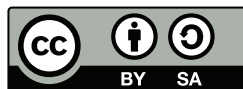
The authors are thankful to participants, Juan Camilo Bravo, and the students of the CEMOS group at the Universidad Industrial de Santander.

REFERENCES

- Alvarez, R., Pulido, E., & Sierra, D. A. (2017). Climbing/descending stairs detection using inertial sensors and implementing PCA and a SVM classifier. *IFMBE Proceedings*, 60. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4086-3_146
- Bravo, J. (2017). *Diseño y desarrollo de un prototipo para inferir ubicación mediante el algoritmo dead reckoning utilizando métodos de corrección de errores*. [Master's Thesis, Universidad Industrial de Santander], Bucaramanga, Colombia.

- Igual, R., Medrano, C., & Plaza, I. (2013). Challenges, issues and trends in fall detection systems. *BioMed Eng OnLine*, 12(66). <https://doi.org/10.1186/1475-925X-12-66>
- Inman V, Ralston HJ, y Todd F. (2006). Human locomotion. In Rose J. & Gamble J. G. (Eds.), *Human walking*. (pp. 1-18). Williams & Wilkins.
- James, S. L., Lucchesi, L. R., Bisignano, C., Castle, C. D., Dingels, Z. v., Fox, J. T., ... Murray, C. J. L. (2019). The global burden of falls: Global, regional and national estimates of morbidity and mortality from the Global Burden of Disease Study 2017. *Injury Prevention*, 26(32). <https://doi.org/10.1136/injuryprev-2019-043286>
- Kangas, M., Konttila, A., Lindgren, P., Winblad, I. y Jämsä, T. (2008). Comparison of low-complexity fall detection algorithms for body attached accelerometers. *Gait and Posture*, 28(2). <https://doi.org/doi:10.1016/j.gaitpost.2008.01.003>
- Kumar, P. (2013). *An Inertial Sensing Module for Movement and Posture Monitoring for Assisted Living*. [Master's Thesis, Indian Institute of Technology], Bombay, Bombay, India.
- Lopez-Yunez, A., Vasquez, D., Palacio, L. A., Tiwari, N., Suryadevara, V. K., Anandwala, M. y Rizkalla, M. (2014). A novel approach for high speed wireless pre-fall detection multisensory system. *Midwest Symposium on Circuits and Systems*. 857–859. <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2014.6908550>
- Nooruddin, S., Islam, Md. M., Sharna, F. A., Alhetari, H. & Kabir, M. N. (2021). Sensor-based fall detection systems: a review. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/S12652-021-03248-Z>
- Noury, N., Fleury, A. & Rumeau, P. (2007). Fall Detection – Principles and Methods. *2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, (pp. 1663–1666), <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2007.4352627>
- Patel, M., Pavic, A. & Goodwin, V. A. (2020). Wearable inertial sensors to measure gait and posture characteristic differences in older adult fallers and non-fallers: A scoping review. *Gait and Posture*, 76, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.10.039>

- Pierleoni, P., Belli, A., Palma, L., Pellegrini, M., Pernini, L. & Valenti, S. (2015). A High Reliability Wearable Device for Elderly Fall Detection. *IEEE Sensors Journal*, 15(8), 4544–4553. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2423562>
- Sabatini, A. M., Ligorio, G., Mannini, A., Genovese, V. & Pinna, L. (2016). Prior-to- and post-impact fall detection using inertial and barometric altimeter measurements. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 24(7), 774–783. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2015.2460373>
- Sorvala, A., Alasaarela, E., Sorvoja, H. y Myllyla, R. (2012). A two-threshold fall detection algorithm for reducing false alarms. *6th International Symposium on Medical Information and Communication Technology*, SMICT 2012. <https://doi.org/10.1109/ISMICT.2012.6203028>
- Tinetti, M. E., Liu, W. L., & Claus, E. B. (1993). Predictors and Prognosis of Inability to Get Up After Falls Among Elderly Persons. *JAMA: The Journal of the American Medical Association*, 269(1). <https://doi.org/10.1001/jama.1993.03500010075035>
- Wild, D., Nayak, U. S. L., & Isaacs, B. (1981). How dangerous are falls in old people at home? *British Medical Journal (Clinical Research Ed.)*, 282(6260). <https://doi.org/10.1136/bmj.282.6260.266>
- World Health Organization. (2007). WHO Global Report on Falls Prevention in Older Age. Community Health.
- Yu, X., Qiu, H. & Xiong, S. (2020). A Novel Hybrid Deep Neural Network to Predict Pre-impact Fall for Older People Based on Wearable Inertial Sensors. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 12. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00063>
- Zhang, T., Wang, J., Xu, L. & Liu, P. (2006). Fall detection by wearable sensor and one-class SVM algorithm. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. 345. https://doi.org/doi:10.1007/11816515_104



Optimum load computation of a piezoelectric-based energy harvester

Cálculo de la carga óptima de un sistema de cosecha basado en el efecto piezoeléctrico

Andrés Felipe Gomez-Casseres ¹

Fecha de Recepción: 30 de enero de 2023

Fecha de Aceptación: 15 de mayo de 2024

Cómo citar: Andrés Felipe Gomez-Casseres E. (2022). Optimum load computation of a piezoelectric-based energy harvester. *Tecnura*, 28(79), 53-65. <https://doi.org/10.14483/22487638.22164>

ABSTRACT

Objective: Maximum power extraction from piezoelectric energy harvesters is of key importance in the development of various current technologies. However, direct use of the maximum power transfer theorem on this type of energy harvester produces unstable and non-causal load models, which prevent its synthesis through a power electronic circuit and reduce the power available for the application's specific hardware. This article presents the computation of a causal and stable transfer function that approximates the maximum power extraction load of a linear piezoelectric harvester.

Methodology: Such a model is obtained using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, selected due to the simplicity of its implementation. In this study, a variation of the original algorithm is used to include the stability constraints.

Results: The algorithm was employed to obtain 7th, 8th, 16th, and 20th-degree models to evaluate the impact of model complexity on the obtained objective function values. The minimum cumulative square error resulted in an objective function value of approximately $6 \cdot 10^{-7} \Omega^{-2}$, attained by the 7th-degree model.

Conclusions: A stable and causal system model was obtained through a PSO implementation. Results suggest a low dependence of the minimum objective function value on increasing model degrees. Nevertheless, the best model matched the degree of the admittance transfer function. Finally, the implementation of the unconstrained PSO algorithm obtained better results, suggesting that a different optimization algorithm can attain better results.

Financing: This study was funded by the Corporación Nacional de Educación Superior CUN.

Keywords: Maximum power transfer theorem, optimum load, piezoelectric energy harvesting, particle swarm optimization.

¹Candidato a Magister en Ingeniería Electronica de la Pontificia Universidad Javeriana, Ingeniero Electronico de la Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. Docente Asistente en la Corporacion Unificada de Educacion Superior CUN Bogota Colombia

Email: andres_gomezcasseres@cun.edu.co

RESUMEN

Objetivo: La máxima extracción de potencia de los sistemas de cosecha de energía basados en el efecto piezoeléctrico es crucial para el desarrollo de diversas tecnologías actuales. Sin embargo, el uso directo del teorema de transferencia de máxima potencia en este tipo de captadores de energía produce modelos de carga inestables y no causales, que impiden su síntesis a través de un circuito electrónico de potencia y reducen la potencia disponible para el hardware específico de la aplicación. En este artículo, se presenta el cálculo de una función de transferencia causal y estable, que aproxima la máxima extracción de potencia de un cosechador piezoeléctrico lineal.

Metodología: Dicho modelo se obtiene mediante el algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO), seleccionado por su sencillez de implementación. En este estudio, se utiliza una variación del algoritmo original para incluir las restricciones de estabilidad.

Resultados: El algoritmo se empleó para obtener modelos de 7°, 8°, 16° y 20° grado para evaluar el impacto de la complejidad del modelo en los valores de la función objetivo obtenidos. El mínimo error cuadrático acumulado alcanzó un valor de la función objetivo de aproximadamente $6 \cdot 10^{-7} \Omega^{-2}$, alcanzado por el modelo de 7° grado.

Conclusiones: Se obtuvo un modelo estable y causal mediante una implementación de PSO. Los resultados sugieren una baja dependencia del valor mínimo de la función objetivo con el aumento de complejidad del modelo. No obstante, el mejor modelo coincidió con el grado de la función de transferencia de la admitancia. Finalmente, la implementación del algoritmo PSO sin restricciones produjo mejores resultados, sugiriendo que un algoritmo de optimización diferente puede alcanzar mejores resultados.

INTRODUCTION

Energy Harvesting (EH) has been demonstrated to be a promising technology that provides energy to low-power electronics when other, more traditional, methods cannot be used due to cost or reasons of access (Safaei *et al.*, 2019). The scavenging of the energy present in the surrounding environment has led to important advancements in areas like the Internet of Things (IoT), Wireless Sensor Networks (WSN), and systems in hazardous or hard-to-reach environments. In these and many other applications, due to its high output power density, Piezoelectric Energy Harvesting (PEH) serves as an interesting alternative as the new standard power generation system when vibrations or mechanical deformations are present.

Despite its high output power compared to other EH technologies, the generated power from PEH is very sensitive to frequency changes in mechanical excitation. This is because the piezoelectric element is commonly mounted on a glass-fiber beam and, to increase the output power, the system parameters are selected to obtain a highly peaked frequency response. This improves the power obtained when used in applications with very stable and deterministic excitation, but it also prevents energy scavenging in applications with intermittent or stochastic deformations (Uchino, 2018). This

problem is exacerbated by the lack of electronic circuits capable of harvesting the maximum available energy from the linear PEH at every possible extraction frequency (Todaro *et al.*, 2017).

To overcome the problem of harvesting energy at every possible frequency, it is mandatory that the electronic circuit that performs this task synthesize the optimum load of the PEH (Bowden *et al.*, 2015; Cammarano *et al.*, 2014; Ocalan *et al.*, 2017; Uchino, 2018). Given the dependency of the PEH impedance on the number of resonant frequencies and the geometry of the PEH, its computation could become very complex; this complexity is further compounded if an optimized geometry is used (Yang & Tang, 2009). Therefore, computing the optimum load becomes a rather intricate problem. Moreover, when the impedance of the PEH is available, the optimum load model obtained from the direct application of the Maximum Power Transfer Theorem (MPTT) can suffer from causality and instability issues, preventing straightforward implementation.

In this study, an alternative method based on the solution of an optimization problem to approximate the optimum load of a PEH is presented. This method guarantees the maximum power extraction from a PEH at several extraction frequencies, while producing an implementable model to control the output PEH current needed to emulate such a load by an electronic circuit.

PEH EQUIVALENT CIRCUIT

Figure 1 shows the equivalent circuit of a PEH, proposed by Yang (2009). This circuit is composed of two subcircuits that model the mechanical and electrical behavior of the PEH. The mechanical subcircuit is formed by k RLC circuits, in series with their respective voltage source v_k , connected in parallel through k ideal transformers. The RLC circuits model the mechanical behavior, in terms of stresses and deformations, of the PEH, while the transformers model the coupling between mechanical and electrical phenomena. Each k^{th} subcircuit represents a resonance of the PEH. Moreover, the electrical subcircuit is formed by the intrinsic capacitance of the piezoelectric material, C_p .

To calculate the optimum load of the PEH, the source admittance must be obtained. This quantity is presented in equation (1), where $s = j\omega$ and the transformer gain is computed as the number of turns on the mechanical side over the same number on the electrical side of the equivalent circuit. Furthermore, in Table 1, the component values for the first three resonant frequencies obtained by (Yang & Tang, 2009) are presented. With these values, the frequency response of the source admit-

tance of the PEH is presented in Figure 2. It should be pointed out that, unlike the second and the third resonant frequencies, which exhibit capacitive behaviors, the PEH displays an inductive behavior, represented by a negative phase, at the first resonance. This unexpected result proves that the second term of equation (1), which models the mechanical response, plays a major role in defining the output admittance.

$$Y_s = sC_e + \sum_{i=1}^k \frac{sN_i^2}{s^2L_i + sR_i + 1/C_i} \quad (1)$$

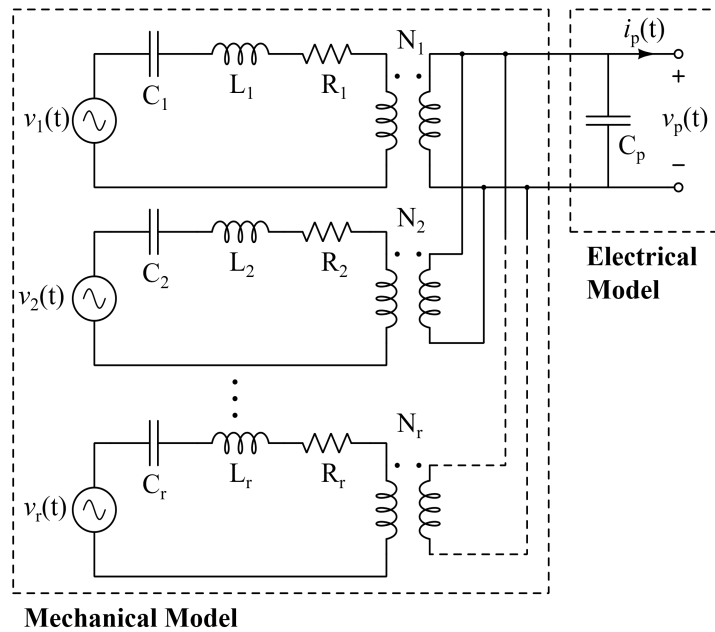


Figure 1. Equivalent electrical model of the PEH presented in (Yang & Tang, 2009)

Optimum Load through direct MPTT

Substituting the values presented in Table 1 on equation (1) and computing its complex conjugate, the optimum load of the PEH is obtained and presented in equation (2). This transfer function represents the optimal relation between the output current and voltage for obtaining the maximum power extraction from the PEH. Two major problems presented by the computed load admittance are its instability, given that its poles, which are $171,78 \pm 5505,48j$, $28,934 \pm 2096,83j$, $3,4683 \pm 412,59j$, have positive real values, and that equation (2) is a not proper transfer function. In this regard, although the unsuitability of the load admittance can be solved by adding additional high-frequency poles

while maintaining its low-frequency behavior, the instability problem makes the implementation of equation (2) impossible.

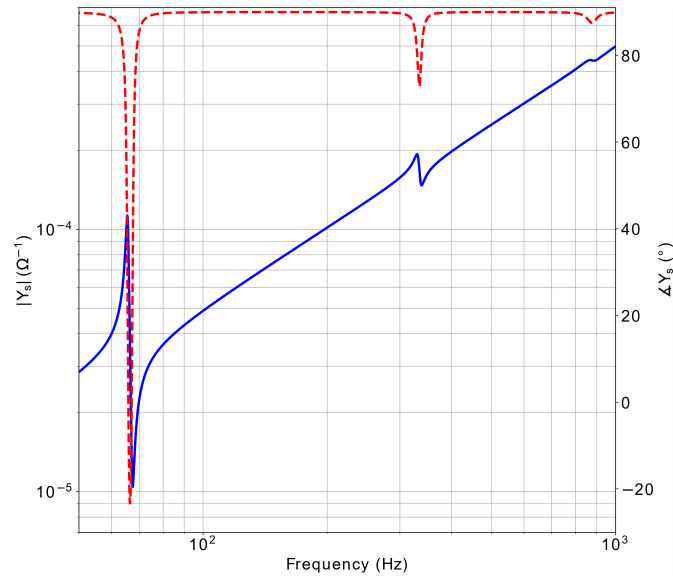


Figure 2. Source admittance at the output port (blue: magnitude response and red: phase response) of the PEH presented in (Yang & Tang, 2009).

Table 1. Piezoelectric Model Parameters and Optimal Load Values

Parameter	1 st Resonant Frequency	2 nd Resonant Frequency	3 rd Resonant Frequency
f_r	66.505 Hz	334.409 Hz	876.822 Hz
C_r	5,874 μ F	227.4 nF	32.96 nF
L_r	1 H	1 H	1 H
R_r	6,9366 Ω	57,868 Ω	343,56 Ω
N_r	0.0267198	0.0541673	0.0817594
Y_{opt}	29,67 + 12,75j μ S	49,74 161,465j μ S	– 19,46 – 440,3j μ S
L_{opt}	32.4787 nF	2.9493 H	0.4122 H
R_{opt}	31,781K Ω	20,116 K Ω	51,377 K Ω

$$Y_L = \frac{-3,52 \cdot 10^{-27} s^7 + 1,44 \cdot 10^{-24} s^6 - 1,24 \cdot 10^{-19} s^5 + 1,27 \cdot 10^{-17} s^4 - 4,98 \cdot 10^{-13} s^3 + 5,37 \cdot 10^{-12} s^2 - 8,51 \cdot 10^{-8} s}{4,4 \cdot 10^{-20} s^6 - 1,8 \cdot 10^{-17} s^5 + 1,54 \cdot 10^{-12} s^4 - 1,57 \cdot 10^{-10} s^3 + 6,14 \cdot 10^{-6} s^2 - 6,52 \cdot 10^{-5} s + 1} \quad (2)$$

Given the problems outlined, a common approach found in the literature is to load the PEH with a single-frequency optimum admittance. This approach uses a simple load admittance to achieve MPTT at a single resonant frequency. The optimum admittances for each resonant frequency, together with the circuit values that implement them, are presented in Table 1. It should be noted that the two components used to implement the optimum admittance are connected in parallel.

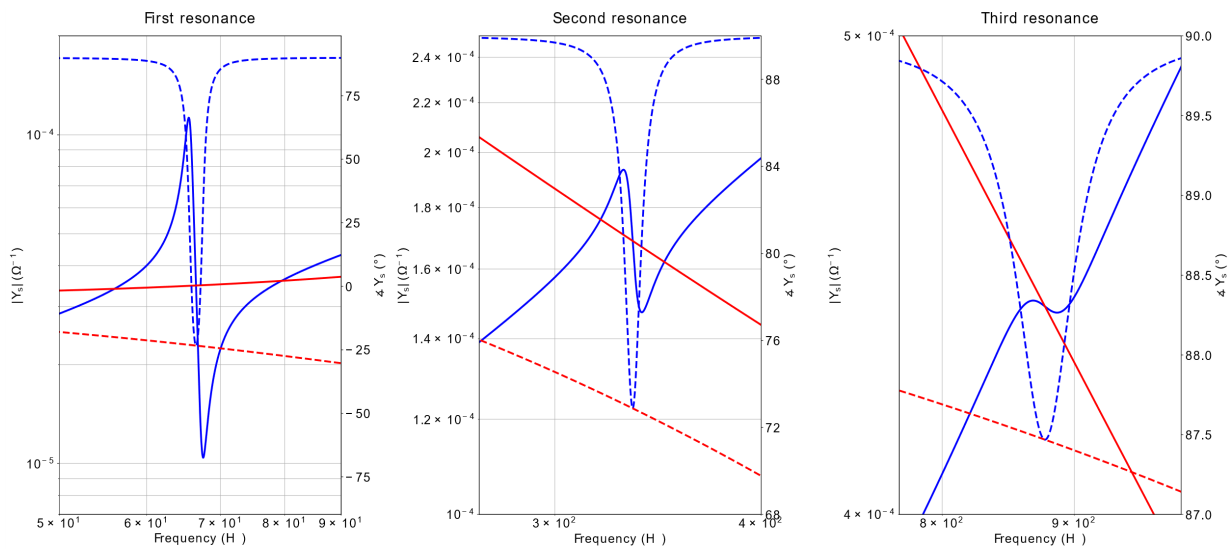


Figure 3. The complex conjugate of the load admittance (red) and source admittance (blue) for the first, second, and third resonant frequencies. Continuous lines correspond to the magnitude, while dashed lines represent the admittance phase.

Figure 3 presents the frequency responses of the complex conjugate for the three load admittances, together with the source admittance. As stated by the MPTT, the complex conjugate of the load must be equal to the source inductance, as evidenced in Figure 3. However, although the MPTT is verified at each resonant frequency, in the vicinity this condition does not hold, which leads to admittance mismatch and reduction of the extracted power. Furthermore, the three loads cannot be implemented simultaneously, meaning that the power generated at higher resonances is normally not harvested.

METHODOLOGY

As shown in the previous section, the computation of the optimum load of a PEH presents an instability problem if the maximum power transfer theorem is directly applied. Therefore, as an alternative method, the computation of the optimum load through the solution of an optimization problem is proposed. The problem is formulated as follows: Find the poles and zeros of a n^{th} order transfer function ($Y(s)$) that minimize the integral of the mean quadratic error of $Y(s)$ with the admittance presented in equation (2). This problem is presented mathematically in equation (3), where the non-negative restriction on the poles is imposed to attain BIBO stability, f_c is the maximum frequency considered and $Y(s)$ is equal to $\prod_{i=1}^n (s + z_i) / \prod_{i=1}^n (s + p_i)$.

$$\begin{aligned} \min \int_0^{2f_c} \|Y(s) - Y_L\|_2^2 ds \\ \text{s.t. } R(p_i) \leq 0 \\ z_i, p_i \in C \end{aligned} \quad (3)$$

Given that the optimization problem presented in equation (3) is not convex (given that $Y(s)$ is the ratio of two functions), the implementation of a heuristic technique is preferred. Therefore, the Particle Swarm Optimization (PSO) method is selected due to the simplicity of its implementation. It should be noted that this study uses a variation of the original method presented in Liu and Lin (2007) and Rao (2009), given the constrained nature of the problem through a penalty function approach. The steps of the PSO algorithm are listed below:

1. Generate the particle population
2. Compute the penalty objective function $F(X)$. This is performed by using equation (5), where $f(X)$ is the original objective function in equation (3) and $H(X)$ and $C(i)$ are a penalty factor and a dynamical penalty value (dependent on the iteration number i), respectively. The expression of $H(X)$ and $C(i)$ are presented in equations (6) and (7), respectively, where $q_i(X) = \max\{0, g_i(X)\}$, $\gamma(q_i(X)) = 1$ if $q_i(X) \leq 1$ and 0 otherwise, and $\theta(q_i(X))$ is presented in equation (8).

$$F(X) = f(X) + C(i)H(X) \quad (4)$$

$$H(X) = \sum_{i=1}^m \left[\theta(q_i(X)) \cdot q_i(X)^{\gamma(q_i(X))} \right] \quad (5)$$

$$C(i) = \left(\hat{c}_i \right) \quad (6)$$

$$\theta(q_i(X)) = a \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{q_i(X)}} \right) + b \quad (7)$$

3. Calculate the velocity of each particle and the new position. This is performed with equations (9) and (10) presented below.

$$V_j^{i+1} = \theta V_j^i + c_1 r_1 (P_{best,j} - X_j) + c_2 r_2 (G_{best,j} - X_j) \quad (8)$$

$$X_j^{i+1} = X_j^i + V_j^{i+1} \quad (9)$$

4. If the convergence criterion is met (which can be stated as $conv < conv_0$, where $conv$ is the magnitude difference between the highest and the lowest individual in the population at each iteration, and $conv_0$ is the difference computed after the generation of the swarm) or the maximum iteration number is achieved, the algorithm finishes. It should be pointed out that, for every iteration, the best individual in the population and its objective function value were stored and compared with other iterations.

RESULTS

The algorithm presented in the previous section was computed several times for different values of n to compare the results and verify if increasing n improves the value of the objective function. Also, an unconstrained implementation of the PSO algorithm was implemented and used for comparison. The results are presented in Table 2. It is clear from the table values that the lowest objective function with stable poles was obtained at the third computation, considering a 7th-degree transfer function as a model. In this case, the zeros and poles of the model were real. The transfer function of the best solution is presented in equation (10) and its frequency response is presented in Figure 4. Finally, the implementation of the PSO algorithm is presented in Appendix 1 using the Python language

$$Y(s) = \frac{(s - 9,3 \cdot 10^4) (s - 9,17 \cdot 10^4) (s - 1,04 \cdot 10^5) (s + 6,36 \cdot 10^4) (s + 1,98 \cdot 10^4) (s - 1,81 \cdot 10^2) (s + 5,22 \cdot 10^4)}{(s + 1,46 \cdot 10^5) (s + 6,81 \cdot 10^4) (s + 1,75 \cdot 10^5) (s + 1,57 \cdot 10^5) (s + 1,69 \cdot 10^5) (s + 7,01 \cdot 10^4) (s + 2,33 \cdot 10^5)} \quad (10)$$

Table 2. Objective function values obtained from the applications of the PSO algorithm.

n	1 st computation		2 nd computation		3 rd computation	
	f_{obj} value	unstable p_i	f_{obj} value	unstable p_i	f_{obj} value	unstable p_i
7	$5,3692 \cdot 10^{-7}$	Yes	$4,7788 \cdot 10^{-7}$	Yes	$5,8271 \cdot 10^{-7}$	No
8	$2,8908 \cdot 10^{-5}$	No	$2,3234 \cdot 10^{-5}$	No	$3,9975 \cdot 10^{-5}$	No
16	$4,2431 \cdot 10^{-5}$	No	$4,4796 \cdot 10^{-5}$	No	$6,8842 \cdot 10^{-5}$	No
20	$5,7923 \cdot 10^{-5}$	No	$1,4718 \cdot 10^{-5}$	No	$1,6411 \cdot 10^{-5}$	No

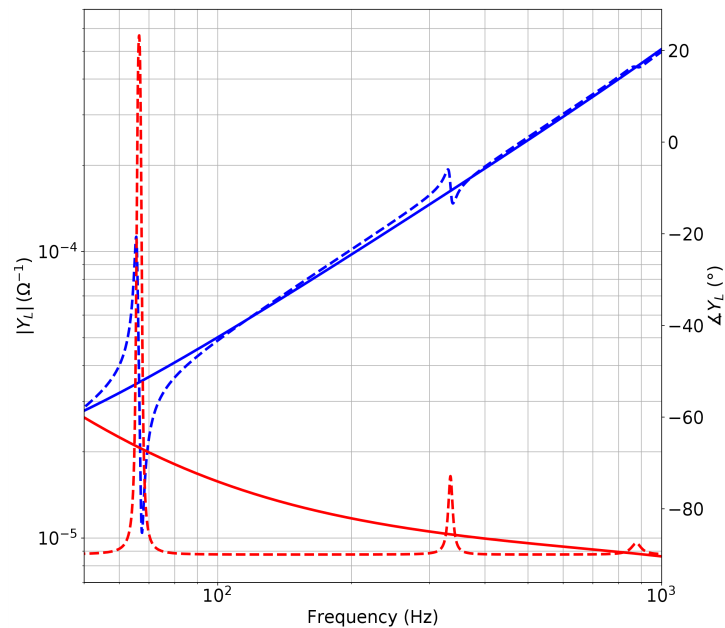


Figure 4. Frequency response of the best-found solution. Magnitude (blue) and phase (red). The dashed lines correspond to the same values of the admittance obtained through the MPT.

CONCLUSION

In this study, the computation of the model parameters of a stable transfer function that minimizes the difference between this model and the maximum power transfer admittance for a piezoelectric energy harvester has been presented. These model parameters have been obtained through the implementation of the PSO method, which has shown a low convergence for the objective function with a value of $5,8271 \cdot 10^{-7} \Omega^{-2}$. These results suggest a low dependence of the minimum objective function value on the model degree, matching the degrees of the obtained model with the admittance from the harvester. Finally, for this application, the unconstrained objective function provided better results, in terms of objective function values, than its constrained counterpart. For this reason, the exploration of other heuristics is proposed, as it can lead to better results.

FUNDING

This research was part of the project entitled “Desarrollo de un sistema de recolección de energía (Energy Harvester) basado en el efecto piezoeléctrico”, which was funded by the Corporación Nacional de Educación Superior CUN.

REFERENCES

- Bowden, J. A., Burrow, S. G., Cammarano, A., Clare, L. R., & Mitcheson, P. D. (2015). Switched-mode load impedance synthesis to parametrically tune electromagnetic vibration energy harvesters. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(2), 603–610. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2325825>
- Cammarano, A., Neild, S. A., Burrow, S. G., Wagg, D. J., & Inman, D. J. (2014). Optimum resistive loads for vibration-based electromagnetic energy harvesters with a stiffening nonlinearity. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 25(??), 1757–1770. <https://doi.org/10.1177/1045389X14523854>

- Liu, J.-L., & Lin, J.-H. (2007). Evolutionary computation of unconstrained and constrained problems using a novel momentum-type particle swarm optimization. *Engineering Optimization*, 39(3), 287–305. <https://doi.org/10.1080/03052150601131000>
- Ocalan, M., Pabon, H., Chang, S., & Lang, J. (2017). *Non-stationary Multi-frequency Vibration Energy Harvesting with Tunable Electrical Impedance* (Patent No. US 9,595,893 B2).
- Rao, S. S. (2009). *Engineering optimization theory and practice / Singiresu S. Rao*. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat01040a&AN=pujbc.856901&site=eds-live>
- Safaei, M., Sodano, H. A., & Anton, S. R. (2019). A review of energy harvesting using piezoelectric materials: State-of-the-art a decade later (2008-2018). *Smart Materials and Structures*, 28(11). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab36e4>
- Todaro, M. T., Guido, F., Mastronardi, V., Desmaele, D., Epifani, G., Algieri, L., & de Vittorio, M. (2017). Piezoelectric MEMS vibrational energy harvesters: Advances and outlook. *Microelectronic Engineering*, 183–184, 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2017.10.005>
- Uchino, K. (2018). Piezoelectric Energy Harvesting Systems—Essentials to Successful Developments. *Energy Technology*, 6(5), 829–848. <https://doi.org/10.1002/ente.201700785>
- Yang, Y., & Tang, L. (2009). Equivalent Circuit Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20(??), 2223–2235. <https://doi.org/10.1177/1045389X09351757>

APPENDIX 1: IMPLEMENTATION OF THE PSO ALGORITHM

```
def integrand(wn,X,a,Y_obj):  
    Yzp = 1  
    for k in range(a):  
        Yzp = (X[k]+1j*wn)*(np.conj(X[k])+1j*wn)*Yzp  
    for k in range(X.size-a):  
        Yzp = Yzp/((X[k+a]+1j*wn)*(np.conj(X[k+a])+1j*wn))
```

```
return np.abs(Yzp-Y_obj(wn))**2
def obj_func(fc,X,a_int,Y_obj,a_pso,b_pso):
f = integral.quad(integrand,0,2*np.pi*fc,args=(X,a_int,Y_obj))[0]
g_i = np.concatenate((np.zeros(a_int),-np.real(X[a_int:])),axis=0)
q_i = np.maximum(g_i,np.zeros(X.size))
gamma = np.empty(X.size)
for k in range(X.size):
if q_i[k]<=1:
gamma[k] = 1
else:
gamma[k] = 2
theta = a*(1-1/np.exp(q_i))+b
H = np.sum(theta*q_i**gamma)
return f,H
n_poles, n_zeros = 20, 20
N = 600
c1, c2 = 2, 2
a, b = 150, 10
c, alpha = 0.5, 2
theta_max, theta_min = 1, 0.4
i_max = 250
X = 10000*(np.random.rand(N,int((n_poles+n_zeros)/2))
+1j*np.random.rand(N,int((n_poles+n_zeros)/2))-0.5j)
V = np.zeros((N,int((n_poles+n_zeros)/2)))
F = np.empty(N)
P_best = 10e12*np.ones(N)
X_p_best = np.empty((N,int((n_poles+n_zeros)/2)))
G_best = 10e12
X_g_best = np.empty(int((n_poles+n_zeros)/2))
```

```
i = 0
conv_circle = np.max(np.abs(X))- np.min(np.abs(X))
conv_circle_0 = np.max(np.abs(X))- np.min(np.abs(X))
while i<=i_max and conv_circle>0.1*conv_circle_0:
for k in range(N):
    fopt, h = obj_func(1000,X[k],int(n_zeros/2),YL_n,a,b)
    C_i = (c*i)**alpha
    F[k] = fopt + C_i*h
    if F[k]<P_best[k]:
        P_best[k] = F[k]
        X_p_best[k] = X[k]
    if F[k]<G_best:
        G_best = F[k]
        X_g_best = X[k]
    theta = theta_max - i*(theta_max-theta_min)/i_max
    r1 = np.random.rand()
    r2 = np.random.rand()
    V = theta*V + c1*r1*(X_p_best-X) + c2*r2*(X_g_best-X)
    X = X + V
    conv_circle = np.max(np.abs(X))- np.min(np.abs(X))
i = i+1
```



Application of machine learning for predictions of consecutive dependent data of type $\{[(a, b) \rightarrow c] \rightarrow d\}$

Aplicación de machine learning para predicciones de datos dependientes consecutivos de tipo $\{[(a, b) \rightarrow c] \rightarrow d\}$

Diego Alexander Quevedo Piratova ¹, Jhon Uberney Londoño Villalba ², Arnaldo Andres Gonzalez Gomez ³

Fecha de Recepción: 30 de enero de 2023

Fecha de Aceptación: 23 de abril de 2024

Cómo citar: Quevedo-Piratova., D.A. , Villalba-Londoño., J.U. y Gonzalez-Gomez., A.A (2022). Application of machine learning for predictions of consecutive dependent data of type $\{[(a, b) \rightarrow c] \rightarrow d\}$ *Tecnura*, 28(79), 66-86. <https://doi.org/10.14483/22487638.22094>

ABSTRACT

Objective: Machine learning techniques have emerged in response to the desire for automatic pattern detection within datasets in fields such as statistics, mathematics, and data analytics. They allow for the extraction of relevant information from datasets of significantly large volumes, providing the possibility of making predictions. This paper presents an application focused on decision trees, linear regression, and random forest regression algorithms to predict final data from consecutive dependent data of type $\{[(a, b) \rightarrow c] \rightarrow D\}$.

Methodology: The study adopts a quantitative research design, which takes as input datasets based on interval data. It utilizes a correlational research model by implementing Python and its Scikit-Learn library, which includes various algorithms for prediction. Specifically, we compare the application of decision trees, linear regression, and random forest regression on the same set of datasets, but with a characteristic of dependency between them.

Results: Upon application of the proposed model, it yields an estimated prediction score, which indicates the accuracy of the model concerning the data provided.

¹Magister in Educational Technology, Magister in Innovative Media for Education. Graduated in Technological Design, systems engineering student. Research professor of the AXON research group attached to the systems engineering program of the engineering school of the National Unified Corporation for Higher Education CUN. Bogotá Colombia.

Email: diego_quevedo@cun.edu.co

²Master in Educational Technology Management, Specialist in Virtual Learning Environments. Graduated in Technological Design, systems engineering student. Research professor of the AXON research group attached to the systems engineering program of the engineering school of the National Unified Corporation for Higher Education CUN. Bogotá Colombia.

Email: jhon.londono@cun.edu.co

³Electronic Engineer graduated from the Francisco José de Caldas District University, specializing in Data Analytics. Research professor of the AXON research group assigned to the systems engineering program of the engineering school of the National Unified Corporation for Higher Education CUN . Bogotá Colombia.

Email: arnaldo_gonzalez@cun.edu.co

Conclusions: The application of a complex algorithm does not inherently guarantee a higher rate of accuracy. Conversely, configuring the model correctly, training multiple trees, or adjusting parameter values can significantly enhance the obtained results

Financing: Unified National Corporation for Higher Education (CUN).

Keywords: algorithms, datasets, decision trees, Python, prediction, Scikit-Learn, linear regression

RESUMEN

Objetivo: Las técnicas de Machine Learning surgen como una respuesta al deseo de detectar automáticamente patrones en un conjunto de datos (*datasets*) en campos como la estadística, la matemática y la analítica de datos, permitiendo extraer información relevante de *datasets* de volúmenes significativamente grandes y realizar predicciones. Éste artículo presenta una aplicación enfocada en los algoritmos de árboles de decisión, regresión lineal y regresión aleatoria de tipo bosque para predecir un dato final a partir de datos dependientes consecutivos de tipo $\{(a, b) \rightarrow c\} \rightarrow D$.

Metodología: Se parte de un diseño de investigación cuantitativo, que toma como insumo unos *datasets* basados en datos de intervalo, establecidos en un modelo de investigación correlacional al aplicar Python y su librería Scikit-learn. Esta biblioteca incluye diferentes algoritmos que pueden ser utilizados para realizar predicciones. En este caso, se compara la aplicación de árboles de decisión, regresión lineal y regresión aleatoria de tipo bosque sobre un mismo grupo de *datasets*, pero que tienen una característica de dependencia entre ellos.

Resultados: Cuando se aplica el modelo propuesto, este genera un puntaje estimado de la predicción, el cual indica la precisión del modelo respecto a los datos entregados.

Conclusiones: La aplicación de un algoritmo complejo no garantiza un mayor índice de precisión; por el contrario, configurar de manera correcta el modelo, entrenando múltiples árboles o cambiando los valores de los parámetros mejora en gran medida los resultados obtenidos.

Financiamiento: Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (CUN).

Palabras clave: Python, Scikit-Learn, algoritmos, predicción, árboles de decisión, regresión lineal, *datasets*

INTRODUCTION

The desire for automatic pattern detection in datasets has long been pervasive in fields such as statistics, mathematics, and data analytics. Machine Learning emerges as a solution to fulfill this desire, as it allows for the extraction of relevant information in datasets of considerable size while providing prediction possibilities that range from simple classification to clairvoyance or other mystical art. In this context, Python and its Scikit-Learn library employ various machine-learning algorithms for predictive data analysis. This paper focuses on decision trees, linear regression, and Random Forest Regression algorithms to predict final data from consecutive dependent data of type $\{(a, b) \rightarrow c\} \rightarrow D$. The predictive performance of each model is assessed based on the dataset and the strategy presented to the algorithms.

Definition

Depending on the field and the data's origin, datasets can be subjected to various analyses using different tools to tackle a wide array of problems. In this study, supervised learning is applied, wherein "the machine is trained with labeled data as an example, thus providing a learning guide" (Maisueche Cuadrado, 2019, p. 13). Within the domain of supervised learning, there are multiple regression and classification algorithms. This article specifically delves into decision tree, linear regression, and Random Forest regression algorithms for comparative forecasting. Decision trees are widely utilized for their simplicity and stability, despite their extreme rigidity, being recognized as "models of supervised inductive learning, non-parametric, most used as a form of representation of knowledge" (Segura Cardona, 2012, p. 99). Linear regression algorithms, on the other hand, present a more intricate understanding and application due to its flexibility, which can yield inconsistent responses. Finally, Random Forest regression algorithms often demand higher resource consumption, due to their robust calculations and variants. This study aims to derive insights from consecutive dependent datasets of the type $\{(a, b) \rightarrow c\} \rightarrow D$, where the initial prediction C is integrated with the initial dataset ab to arrive at a final prediction D. This can be extrapolated to larger datasets with similar dependent relationships, altering not the complexity of the problem, but the way the data is modeled.

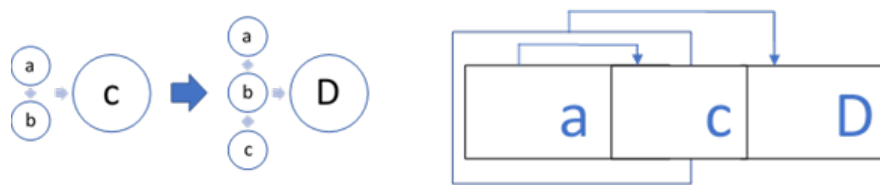


Figura 1. Consecutive dependent dataset of type $\{(a, b) \rightarrow c\} \rightarrow D$.

Source: Own work.

Justification

The traditional way to approach a final prediction problem involves associating an item, product, or category with a series of values from a database, which are then used to obtain the final forecast data. Although efficient, this approach requires having all the data before attempting any predictions. Consider a scenario where the independent arrival of two components affects the fi-

nal delivery time of a product, which in turn causes the final selling price to increase or decrease. $\{[(\text{Time 1}, \text{Time 2}) \rightarrow \text{Time 3}] \rightarrow \text{Price}\}$. Another scenario could involve the interconnection of various tasks within a subject whose contents are prerequisites for the following activities. While the tasks themselves are not analyzed, their collective outcomes can be validated, noted, and used to forecast results $\{[(\text{Note 1}, \text{Note 2}) \rightarrow \text{Note 3}] \rightarrow \text{Final Note}\}$. Both scenarios can be generalized to multiple datasets concatenated in analogous ways.

In this context, multiple linear regression “ tries to fit linear or linearizable models between a dependent variable and more than a few independent variables” (Montero Granados, 2016, p. 1). Meanwhile, decision trees are described as a “non-parametric technique [that] classifies a population in a model of branch-type segments that build an inverted tree; this model is then used to predict an objective variable” (Song & Ying, 2015, p. X). Lastly, Forest-type Random Regression algorithms apply multiple decision trees with slight variations, as they are considered “a combination of tree predictors where each tree depends on values from a random vector sampled independently and with the same distribution across all trees in the forest ” (Breiman, 2001, p. X). Any of these Machine Learning algorithms could be applied to address the issues discussed in this article.

Applicability and structure

Linear regression aims to determine a ‘D’ value that fits a previously calculated ‘straight line’ based on data provided to the algorithm. It involves predicting a dependent variable using one or more independent variables ‘a’ by drawing the straight line that best fits the dataset (Maisueche Cuadrado, 2019). Taking into account that the prediction is not 100 % accurate, as the “ sample is an estimate of the model parameters” (Cardona *et al.*, 2014, p. X), adjustments ‘a’ must be made in each new cycle to reduce prediction errors, a process known as minimizing the cost function. Equation (1) represents this model:

$$D(x) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (1)$$

A decision tree learns decision rules derived from features in the dataset, where “ the algorithm performs successive binary partitions in the space of the explanatory variables. In each partition, the algorithm selects the variable that provides the most information, based on a measure of entropy or amount of information” (Díaz Martínez *et al.*, 2004).

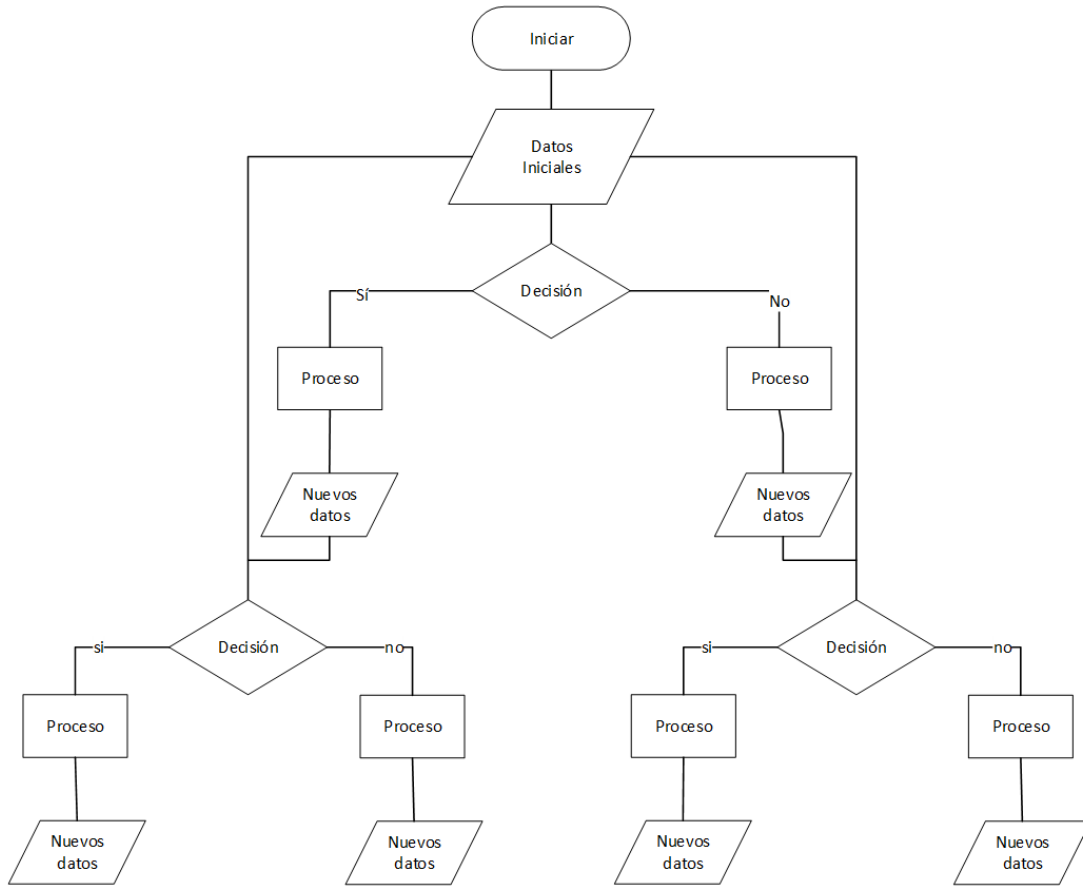


Figura 2. Decision tree structure with dependent data.

Source: own work.

A Forest-type Random regression algorithm, or simply Random Forest Regressor, extends the usage of decision trees by aggregating many of them. This ensemble approach allows for more precise predictions but also consumes significantly more resources, since it is formed “by an algorithm that introduces randomness to reduce the correlation between the trees. Once the forest is built, it can be used to make predictions” (García Ruíz de León *et al.*, 2018, p. 23).

METHODOLOGY

This study adopts a quantitative research design that utilizes datasets based on interval data, accessible through the following link: <https://acortar.link/HUZ7WN>. The research design is

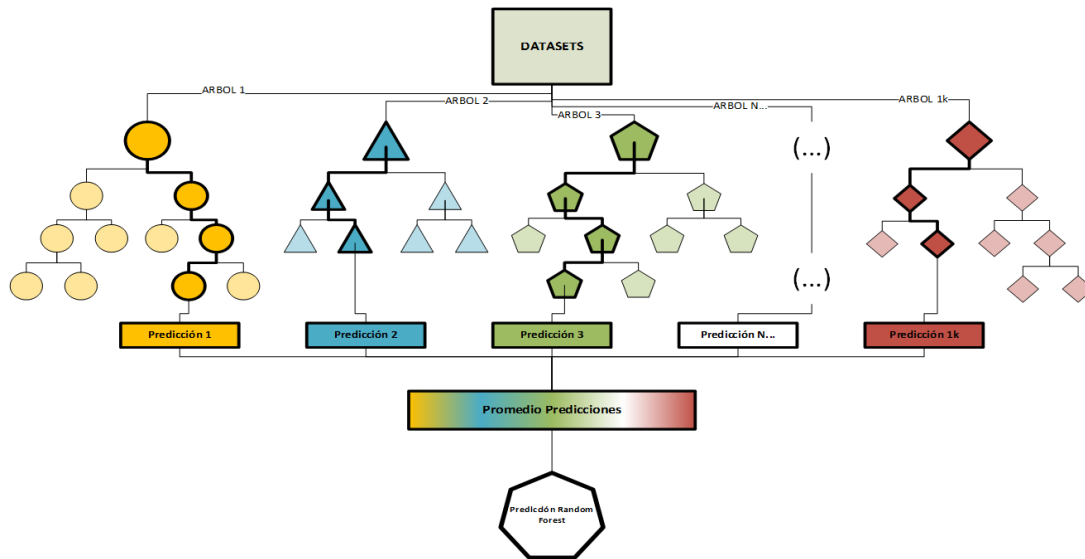


Figura 3. Forest type random regression structure - Random Forest.

Source: own work.

based on a correlational research model, implementing the Python Scikit-Learn library, which offers various algorithms for predictive modeling. Specifically, this study compares the implementation of decision trees, linear regression, and Random Forest Regression on the same group of datasets, which exhibit interdependencies. The evaluation focuses on each model's predictive capacity and the strategies employed by the algorithms. Identifying patterns within datasets and making informed decisions to address problems are fundamental goals of Machine Learning (ML). According to [Bell \(2015\)](#) a ML can be formally defined as a branch of artificial intelligence where “systems can learn and improve with experience and, over time, refine a model that can be used to predict question outcomes based on previous learning.”

ML algorithms fall into two possible categories based on how the data is or is not catalogued:

- Supervised learning involves incorporating labels in the dataset. They allow “ patterns to be detected and used to label new sets of information ” ([Hinestroza Ramírez & Cárdenas, 2018](#)).
- Unsupervised learning, in contrast, does not rely on labels in the dataset, which complicates the search for patterns. As a result, “there is no right or wrong answer; it is just about running the machine learning algorithm and seeing what patterns and results show up ” ([Bell, 2015](#)).

The workflow in ML has been evolving, going from a basic structure comprising four levels (dataset conditioning, representation, learning, and evaluation of the model) to proposals tailored to specific industries of eight or more ranges. Academics projects differ significantly from those in industry. Therefore, merely selecting and training a model is insufficient. Similarly to any project, a well-defined series of stages or steps must be followed to enhance the likelihood of success (Maisueche Cuadrado & Sanz Angulo, 2019).

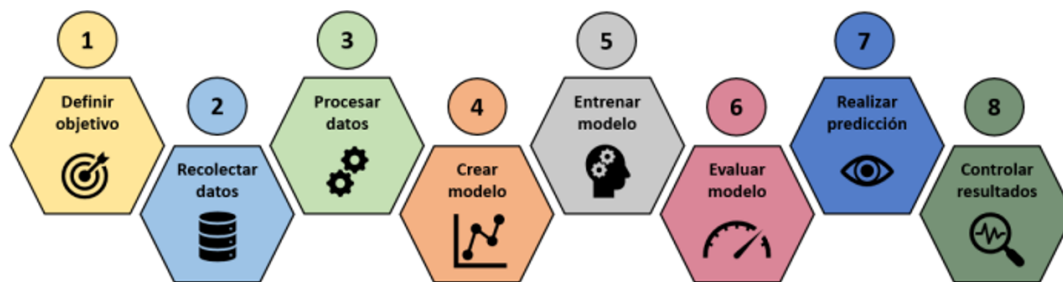


Figure 4. Generic stages to carry out a Machine Learning project.

Source: Maisueche Cuadrado and Sanz Angulo (2019)

The project uses two datasets in Excel, examples of which are presented in Tables 1 and 2. These datasets contained consecutive dependent labeled data of type $\{(a, b) \rightarrow c\} \rightarrow D$, where “c” and “D” are calculated differently from “a” and “b” which are the same in both data sets. ML has been worked on by multiple companies and institutions dedicated to data analytics. This has allowed for the development of various libraries and frameworks focused on ML. Among the most popular are Tensor Flow (Google Brain Team), Pythorch (Facebook’s AI Research Lab – FAIR), Keras (François Chollet – Google) and Scikit-Learn (David Cournapeau).

In this study, Scikit-Learn library is employed to analyze the dataset, mainly because it is the easiest and simplest to implement. It consistently achieves excellent results, at the same time while demanding fewer computational resources compared to other alternatives. As noted by Feurer and Hutter (2019, p. 3), “each machine learning system has hyperparameters, and the most basic task in automated machine learning (AutoML) is to automatically configure these hyperparameters to optimize performance” Any such analysis requires importing the necessary libraries.

Although there are other libraries that you must include such as pandas, numpy, math, xgboost or seaborn, the previous ones are the ones specific to the models used and their corresponding

Cuadro 1. Extract Dataset 1

a	b	c	D
80	51	57	65
80	51	57	65
9	85	12	68
1	69	69	2
15	3.4	77	71
17	6	77	37
43	82	47	21
68	74	26	24
42	53	95	88
35	2	35	100

Source: own work.

Cuadro 2. Extract Dataset 2

a	b	c	D
80	51	65	5
9	85	47	26
1	69	35	98
15	3.4	24	12
17	6	11	22
43	82	62	8
68	74	71	1
42	53	47	3
35	2	18	62

Source: own work.

Cuadro 3. Models and specific libraries needed

Model	Bookshop
Linear regression	from sklearn. linear _model matter LinearRegression
Decision tree	from sklearn. tree matter DecisionTreeClassifier
Forest-like random regression	from sklearn. outfit matter RandomForestRegressor

Source: own work.

graphing . The Dataset must be read immediately and a Dataframe created , in this case we will do it from an Excel file.

```
date = P.S. read _excel ( r './Dataset.xlsx' )
```

The train test split procedure is applied to validate the dataset and simulate how it would behave with new data. Two important parameters in this procedure are "test_size", which specifies the size of the test set, and random_state"which controls the randomness of data selection for training or testing. Adjusting the values of these parameters can impact the accuracy of the model and its subsequent

Cuadro 4. Libraries necessary to make the graphs of the data

Name	Graphic Library
dtreeviz	from dtreeviz. trees import *
IPython	from IPython. display import Image , display_svg , SVG
graphviz	from graphviz matter Digraph
matplotlib	matter matplotlib. pyplot as plt

Source: own work.

predictions. The data used in the study, shown in the figures and results, indicate that increasing these values entails greater resource consumption, potentially obscuring the clarity of the displayed images. This is because by increasing these values, there is also greater resource consumption and the images would not be able to be displayed clearly. Note that this notation expresses the analysis only for the first part of $\{(a, b) \rightarrow c\} \rightarrow D$; the process must be repeated to analyze “D”.

```
test = 0.25
random = twenty-one
X = data [ [ "to" , "b" ] ]
y = data [ "c" ]
X_train , X_test , y_train , y_test = train_test_ split ( X , y
, test_size = test , random_state = random )
```

The `max_depth` parameter must also be specified for the decision tree model since it determines the maximum number of leaves or nodes to be computed. If a value is not placed, the analysis can run indefinitely, consuming high levels of resources.

```
depth = 4
```

The application of the model is the natural step after the previous configurations, each of which requires specific syntax

Cuadro 5. Implementation of models

Model	Code
Linear regression	<code>regressor1 = LinearRegression ()</code> <code>regressor1. fit (X_train , y_train)</code>
Decision tree	<code>decision1 = DecisionTreeRegressor (max_depth = depth)</code> <code>decision1. fit (X_train , y_train)</code>
Forest-type random regression	<code>regressor1 = RandomForestRegressor</code> <code>(n_estimators = 200 , random _state = 0)</code> <code>regressor1. fit (X_train , y_train)</code>

Source: own work.

RESULTS

Applying the model returns an estimated prediction score that indicates the model's accuracy relative to the given data, with the maximum score being 1. In this case, the data taken to calculate are the training data, the process can also be carried out with the test data. The scores obtained after training the models for “*c*” and for “*D*” are shown in Table 6.

Cuadro 6. Implementation of models

Model	Code	C-score	D-score
Linear regression	<code>score = regressor1. score(X_train , y_train)</code>	0.99985200937484	0.18247241602165787
Decision tree	<code>score = decision1. score(X_train , y_train)</code>	0.9446927198245703	-2.640986255989985
Forest-type random regression	<code>score = regressor1. score(X_train , y_train)</code>	0.9997305877339204	0.9561890331775832

Source: own work.

Among the best tools available for analysis are graphs generated in different ways. They enable decision-making regarding adjustments to models, corrections to datasets, and even the selection of appropriate models.

Graphs obtained for linear regression

Code used to generate the graphs: The dispersion analysis shows a correlation between the “a” and “b” categories, which is further reinforced in the subsequent analysis. This reduces dispersion by incorporating the “b” category in the analysis.

```
pandas_plot.scatter_matrix ( X_train , c= y_train , figsize =(10,10)
```

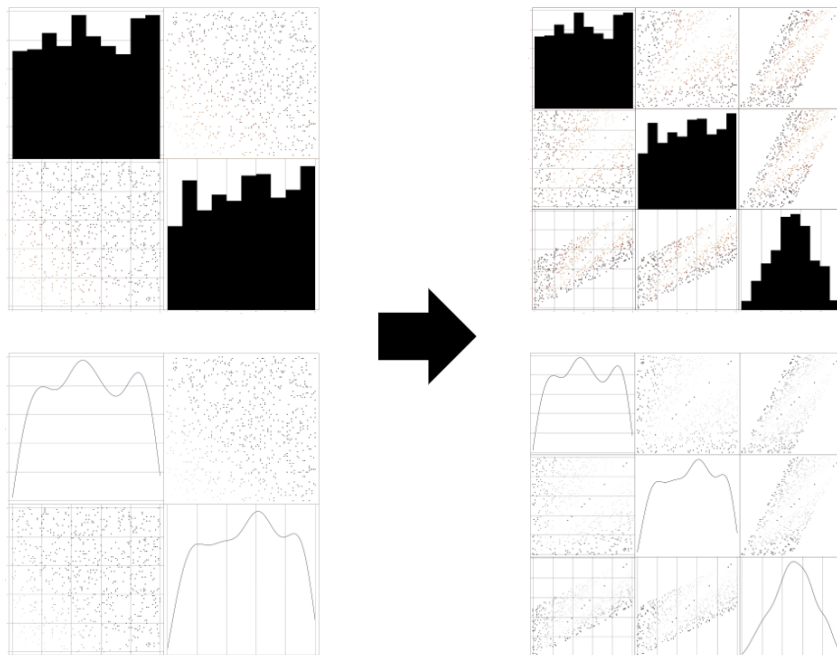


Figure 5. Scatter matrix of type scatter_matrix for “c” and “D” respectively.

Source: own work.

The prediction becomes more uncertain as the number of variables increases. Code used to generate the graphs:

```
visualizer = PredictionError (regressor1)  
visualizer.fit ( X, y)  
visualizer.score (X, y)  
visualizer.show ()
```

Code used to generate the graphs:

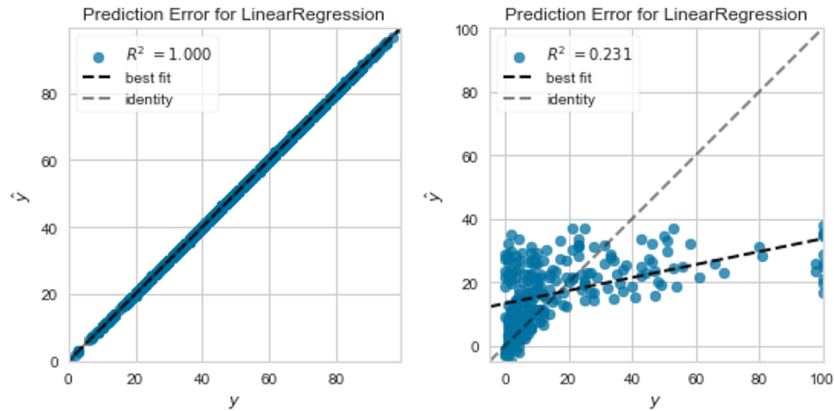


Figure 6. Plot using Prediction Error Plot for “c” on the left and for “D” on the right.

Source:own work.

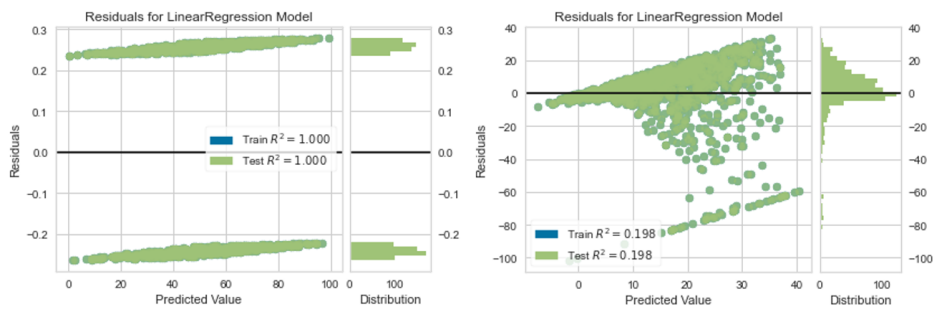


Figure 7. Plot using Residuals Plot for “c” on the left and for “D” on the right.

Source: own work.

```
visualizer = ResidualsPlot (regressor1)
visualizer.fit ( X, y)
visualizer.score (X, y)
visualizer.show ()
```

Decision Tree Charts

Code used to generate the graphs in Figure 9:

```
fig = plt.figure ( figsize =(15,10))
_ = tree.plot _tree (decision2,
```

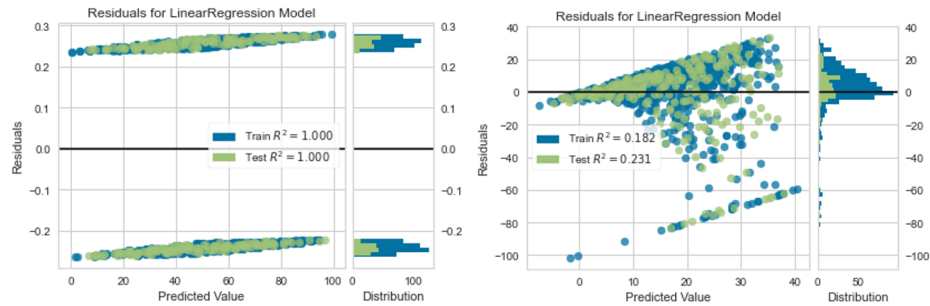


Figure 8. Plot using Residuals Plot for “ca” on the left and for “D” on the right - training data vs test data.

Source: own work.

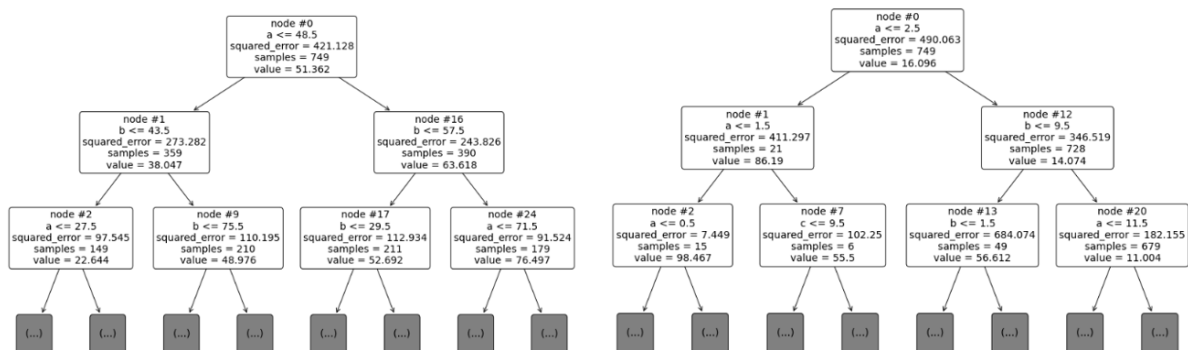


Figure 9. Plot using Pandas Plot for “c” on the left and for “D” on the right.

Source: own work.

```
feature_names = ["a", " b", "c "],
class_names = "D",
max_depth = 2,
node_ids = True,
rounded=True,
fontsize =14,
filled =False)
```

Code used to generate the graphs in Figures 10 and 11:

```
viz = dtreeviz ( decision1,X,Y,
target_name = 'c',
```

```

feature_names = [ "a", "b" ],
X = X.iloc [51],
show_node_labels = False,
fancy=True)
viz

```

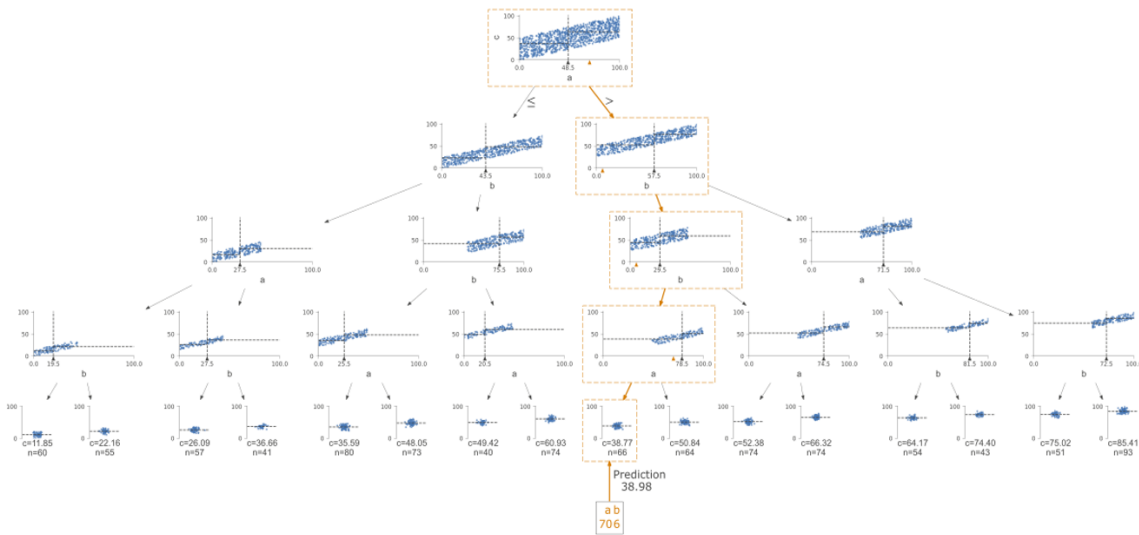


Figure 10. Plot using dtreeviz Plot for “c”.

Source: own work.

Code used to generate Figure 12:

```

figsize = (6.5)
fig = plt.figure ( figsize = figsize )
ax = fig.add_subplot ( 111, projection='3d' )
t = rtreeviz_bivar_3 D( decision1,x,y,
feature_names = [ "a", "b" ],
target_name = 'c',
fontsize =14,
raise =20,
azim =25,

```

```

        dist =8.2,
show={' splits', 'title '}, ax = ax )
plt.show ()
    
```

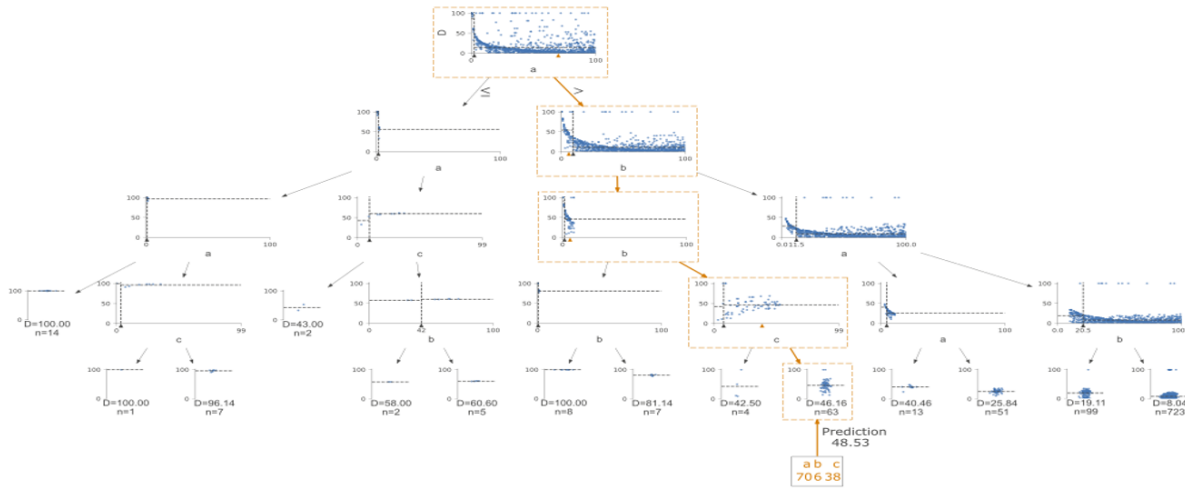


Figure 11. Plot using dtreeviz Plot for “D”

Source: own work

Code used to generate Figure 13

```

t = rtreeviz_bivar_heatmap ( decision1,x,y,
                             feature_names =[ "a", "b"],
                             fontsize =14)
plt.show ()
    
```

Plots for forest-like random regression only for tree 0 of N generated

Code used to generate the graphs 14 and 15:

```

viz = dtreeviz (regressor1[0],X,Y,
                target_name = 'c',
                feature_names =[ "a", "b"],
X = X.iloc [51],
    
```

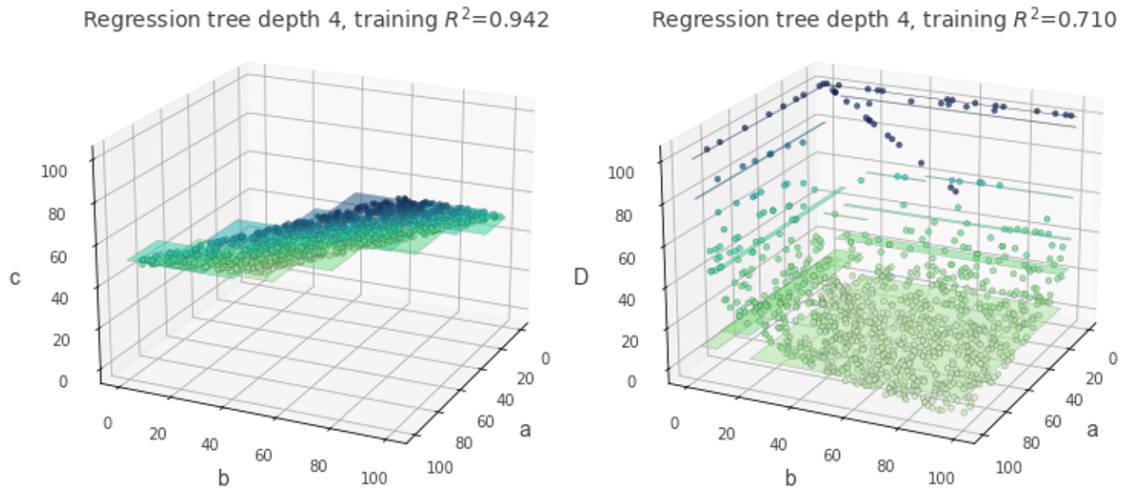


Figure 12. Plot using dtreeviz rtreeviz_bivar_3D Plot for c
Source: own work.

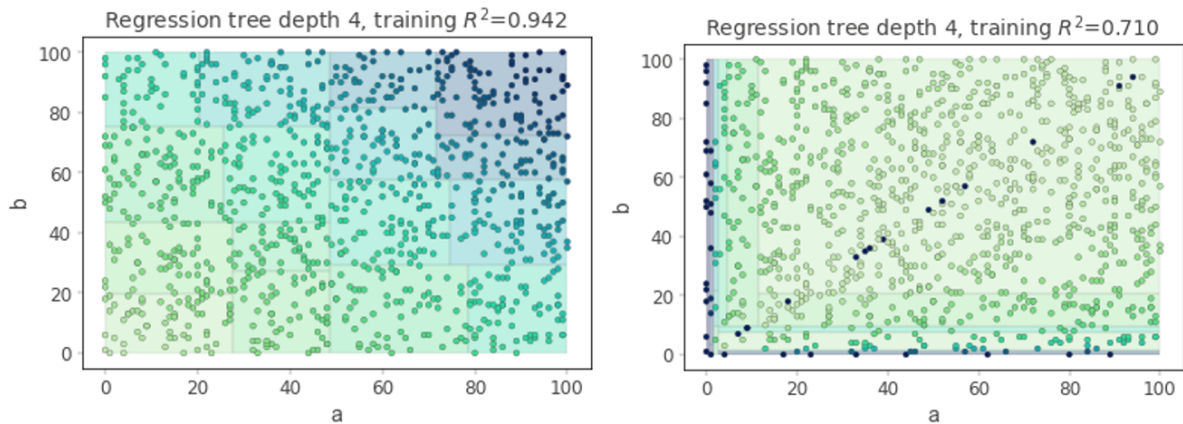


Figure 13. Plot using dtreeviz rtreeviz_bivar_heatmap Plot for D
Source: own work.

```
show_node_labels = False,
fancy=True)
viz
```

Code used to generate Figure 16:

```
figsize = (6.5)
```

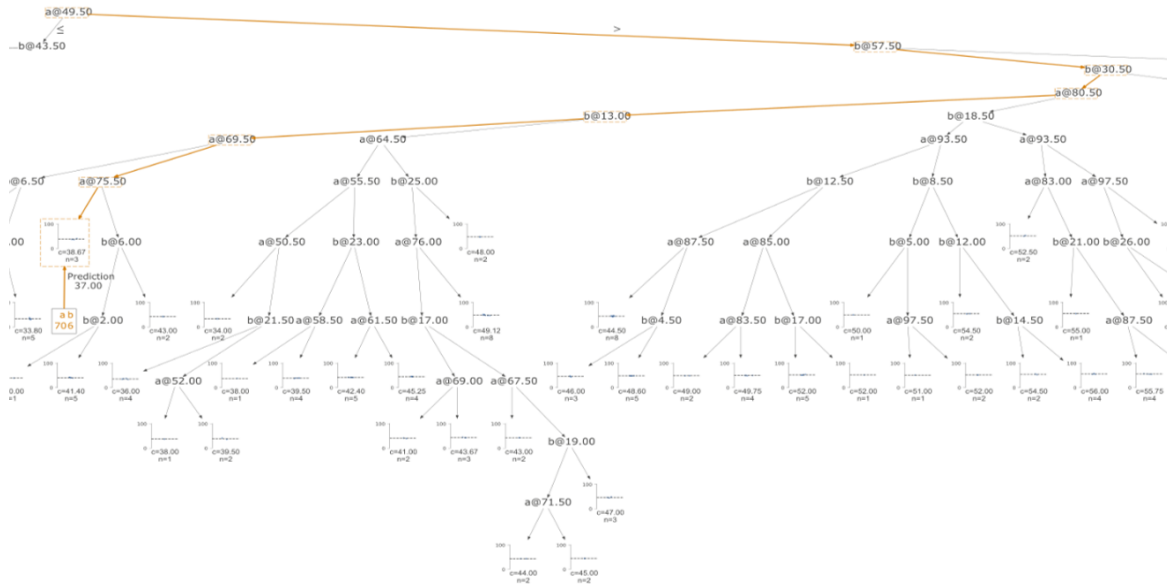


Figure 14. Partial plot using dtreeviz for “c”

Source: own work.

```
fig = plt.figure ( figsize = figsize )
ax = fig.add_subplot ( 111, projection='3d' )
t = rtreeviz_bivar_3D(regressor1[0],x,y,
                      feature_names = [ "a", "b" ],
                      target_name = 'c',
                      fontsize =14,
                      raise =20,
                      azim =25,
                      dist =8.2,
                      show={' splits', 'title ' },ax=ax)
```

Code used to generate Figure 17:

```
t = rtreeviz_bivar_heatmap (regressor1[0],x,y,
                            feature_names = [ "a", "b" ],
                            fontsize =14)
```

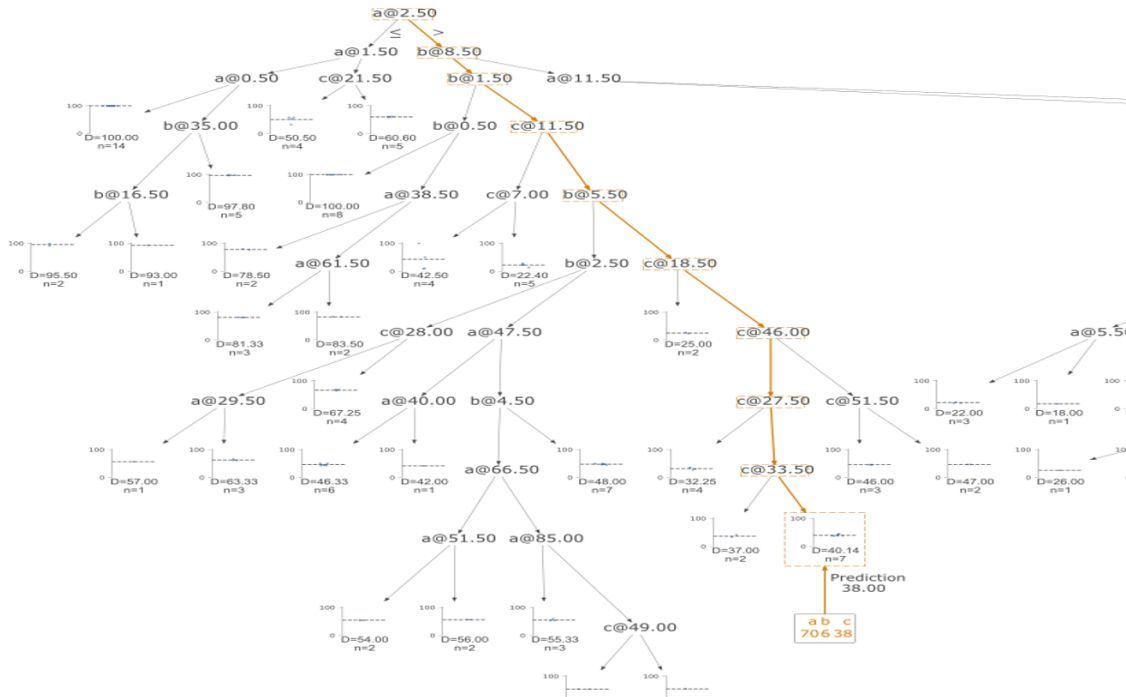


Figure 15. Partial plot using dtreeviz for “D”
 Source: own work.

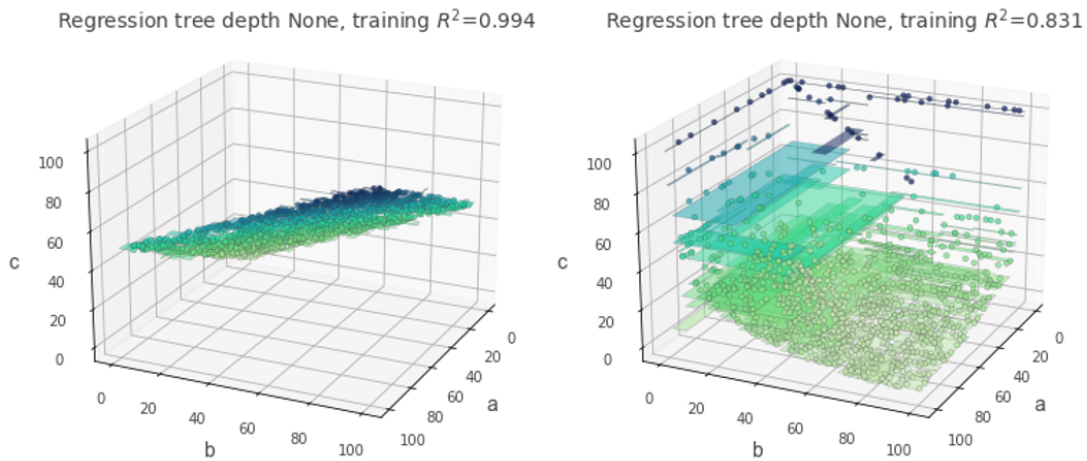


Figure 16. Plot using dtreeviz rtreeviz_bivar_3D Plot for “c” on the left
 Source: own work.

```
plt.show ()
```

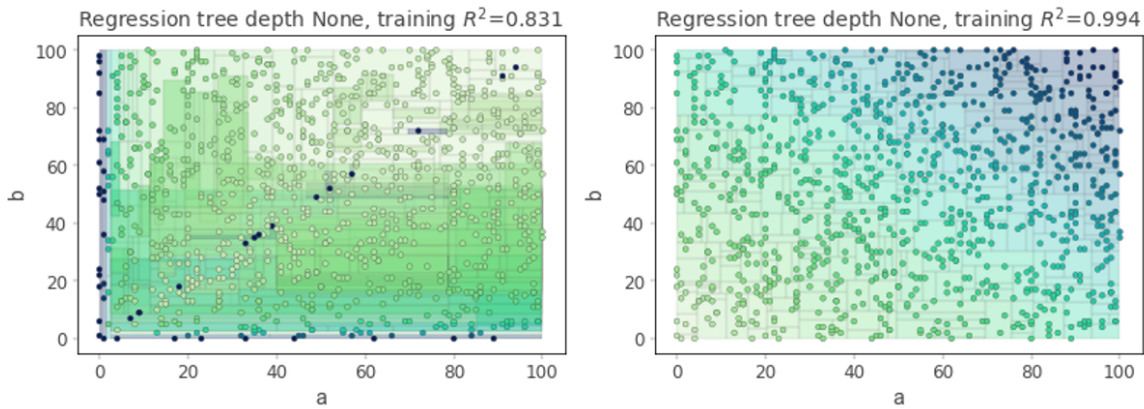


Figure 17. Plot using dtreeviz rtreeviz_bivar_3D Plot for “D”

Source: own work.

CONCLUSIONS

Predictive models are used across many fields for their split approach, facilitating the identification of solutions based on different conditions using the classification or regression methods. Predictive models enable rapid evaluation of multiple options, especially when visual representations of results can be generated, allowing algorithmic decisions to be visually monitored. This process defines critical paths from node to node that influences the final decision.

Decision trees implicitly perform diagnostic variable testing or feature selection. Classification or regression methods require minimal effort from users to prepare the data.

The consumption of computing resources increases as the model’s precision improves. However, a complex algorithm does not guarantee a higher rate of precision effectiveness. Instead, optimal model configuration, training multiple trees, or adjusting parameter values significantly enhances results.

Balancing the dataset before use is essential to avoid applying models with biased data.

FINANCING

The article derives from the research project: “ Application of machine learning for predictions of consecutive dependent data of type $\{(a, b) \rightarrow c\} \rightarrow d$ ” endorsed and financed by the Unified National Corporation for Higher Education (CUN).

REFERENCES

- Bell, J. (2015). Machine learning Hands-On for Developers and Technical Professionals. *Indiana: Wiley*.
- Breiman, L. (2001). Random Forest. California. *University of California*. <https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/randomforest2001.pdf>
- Cardona, D., Rivera, M., González, J., & Cárdenas, E. (2014). Estimación y predicción con el modelo de regresión cúbica aplicado a un problema de salud. *Ingeniería Solidaria, 10(17)*. <https://doi.org/10.16925/in.v9i17.828>
- Díaz Martínez, Z., Fernández Menéndez, J., & Segovia Vargas, J. (2004). Sistemas de inducción de reglas y árboles de decisión aplicados a la predicción de insolvencias en empresas aseguradoras. *Departamento de Economía Financiera y Contabilidad / Departamento de Organización de Empresas. Madrid: Universidad Complutense de Madrid*. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/6833/>
- Feurer, M., & Hutter, F. (2019). Hyperparameter Optimization. In *Automated Machine Learning* (pp. 3-33). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-05318-5>
- García ruiz de León, M., Mira McWilliams, J. M., & Ahrazem Dfuf, I. (2018). Análisis de sensibilidad mediante Random Forest. *Madrid: Universidad Politécnica de Madrid*.
- Hinestroza Ramírez, D., & Cárdenas, J. M. (2018). El Machine Learning a través de los tiempos, y los aportes a la humanidad. *Pereira: Universidad Libre*.
- Maisueche Cuadrado, A. (2019). Utilización del Machine Learning en la industria 4.0. *Valladolid: Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales*. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/37908>

Maisueche Cuadrado, A. (2019). Montero Granados, R. (2016). Modelos de regresión lineal múltiple. *Granada, España: Universidad de Granada*. http://www.ugr.es/~montero/matematicas/regresion_lineal.pdf




Segura Cardona, A. M. (2012). Aplicación de árboles de decisión en la salud pública (Implementation of decision trees in public health) (Aplicação de árvores de decisão em saúde pública). *Revista CES salud pública*, 3(1), 94-103. <http://dx.doi.org/10.21615/2140>

Song, Y.-Y., & Ying, L. (2015). Decision tree methods: applications for classification and prediction. *Shanghai Arch Psychiatry*, 27(2), 130-135. <https://doi.org/10.11919/j.issn.1002-0829.215044>



Simulation of the growth and yield of the species *Gmelina arborea* Roxb

Simulación del crecimiento y el rendimiento de la especie *Gmelina arborea* Roxb

Jairo Alonso Tunjano ¹, Juan Pablo Orejuela Cabrera ² and Germán Jairo Hernández Pérez ³

Fecha de Recepción: 30 de enero de 2023

Fecha de Aceptación: 23 de abril de 2024

Cómo citar: Tunjano., J.A , Orejuela Cabrera., J.P, Hernández Pérez., G.J. (2022). Simulation of the growth and yield of the species *Gmelina arborea* Roxb. *Tecnura*, 28(79), 87-108. <https://doi.org/10.14483/22487638.22064>

ABSTRACT

Forests are being threatened worldwide mainly due to the increased demand for wood, 50 % of which is extracted from forests. This is largely because the forest plantations which supply the market grow at a slow rate. Given that, one of the fundamental goals of forestry research is the construction of growth and yield models to be used as a planning tool. In this way, the proposal of this work is to show how, through the modeling and simulation of the growth of a forest stand, the uncertainty of investors is reduced because it allows for the quantification of the production of wood that will be obtained. The study was based on data obtained from inventories conducted between 2012 and 2015 in 31 permanent plots of *Gmelina arborea* Roxb., located in three municipalities of Tolima: Armero, Coello, and Guamo. Based on the inventory data, three regression models were implemented. These results will be particularly useful for silvicultural management planning as the implemented methodology can be applied in other regions of the world and with other varieties of forest species. As an additional stimulus for investors, the simulation is also able to quantify carbon capture in a technical way to be offered in the carbon bond market.

Keywords: Growth Simulation for forestry, Silvicultural Management, Forest Stand, Carbon Capture,

RESUMEN

Los bosques a nivel mundial se están viendo amenazados principalmente por el aumento de la demanda de madera, ya que más del 50 % de esta se extrae directamente de ellos. Esto se debe en gran medida a que las plantaciones forestales

¹Magister en Ingeniería- Sistemas y computación, Especialista en automatización Industrial, Ingeniero de Sistemas. Estudiante del doctorado en ingeniería: Sistemas y computación de la Universidad Nacional de Colombia. Docente Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia.

Email: jalonso@ut.edu.co

²Doctor en ingeniería, ingeniero industrial. Profesor tiempo completo Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Email: juan.orejuela@correounivalle.edu.co

³Doctor en Ingeniería, Profesor Tiempo Completo, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Email: gjhernandezp@unal.edu.co

crecen a un ritmo lento y abastecen el mercado. Por ello, uno de los objetivos fundamentales de la investigación forestal es la construcción de modelos de crecimiento y rendimiento que sirvan como herramienta de planificación. La propuesta de este trabajo es mostrar cómo a través de la modelación y simulación del crecimiento de un rodal forestal se reduce la incertidumbre de los inversionistas porque permite cuantificar la producción de madera que se obtendrá. El estudio se basó en datos obtenidos de inventarios realizados entre 2012 y 2015 en 31 parcelas permanentes de *Gmelina arborea* Roxb., ubicadas en tres municipios del Tolima: Armero, Coello y Guamo. Con base en los datos del inventario, se implementaron tres modelos de regresión. Estos resultados serán particularmente útiles para la planificación del manejo silvícola, ya que la metodología implementada puede ser aplicada en otras regiones del mundo y con otras variedades de especies forestales. Como estímulo adicional para los inversionistas, en la simulación es posible cuantificar la captura de carbono de manera técnica para ser ofrecido en el mercado de bonos de carbono.

Palabras clave: Simulación de crecimiento para silvicultura, gestión silvícola, masa forestal, captura de carbono,

INTRODUCTION

The importance of forest conservation in the world lies in the fact that, together with the oceans, forests are the main sinks of greenhouse gases, especially carbon dioxide. According to FAO information (FAO, 2020b), by 2020 forests occupied 31 % of the earth's surface with about 4,060 million hectares (ha). Of these forests, 1,827 million hectares (ha) correspond to the tropical domain (45 %).

These forests are heavily threatened by deforestation. According to the same report, by 2020, around 4.5 million hectares of forest will be lost worldwide each year, especially in South America and Africa, where the world's largest tropical forests are located: the Amazon and the Congo rainforest. Africa has the highest annual rate of deforestation: for the period 2010-2020, about 3.9 million hectares (ha) of forest were lost per year. For the same period, South America had an estimated annual loss of 2.6 million hectares (ha) of forest. On the contrary, for the period in question, the loss of natural forest by deforestation is being compensated by reforestation in Asia (1.2 million hectares (ha) per year) and Europe (0.3 million hectares per year) (FAO, 2020b).

From 1990 to 2020, an estimated 420 million hectares of forests have been lost worldwide (FAO, 2020b). The main causes of deforestation are the increase in the agricultural frontier and the production of wood products used in industry worldwide, estimated at two thirds of total production (Thiffault *et al.*, 2021).

According to the Living Forests Model, the total volume of wood extracted from the world's forests estimated for 2016 was 3700 million m³. It is expected that by 2030, the global demand for wood will

be approximately double (Dash, Moore, Lee, Klápště, & Dungey, 2019).

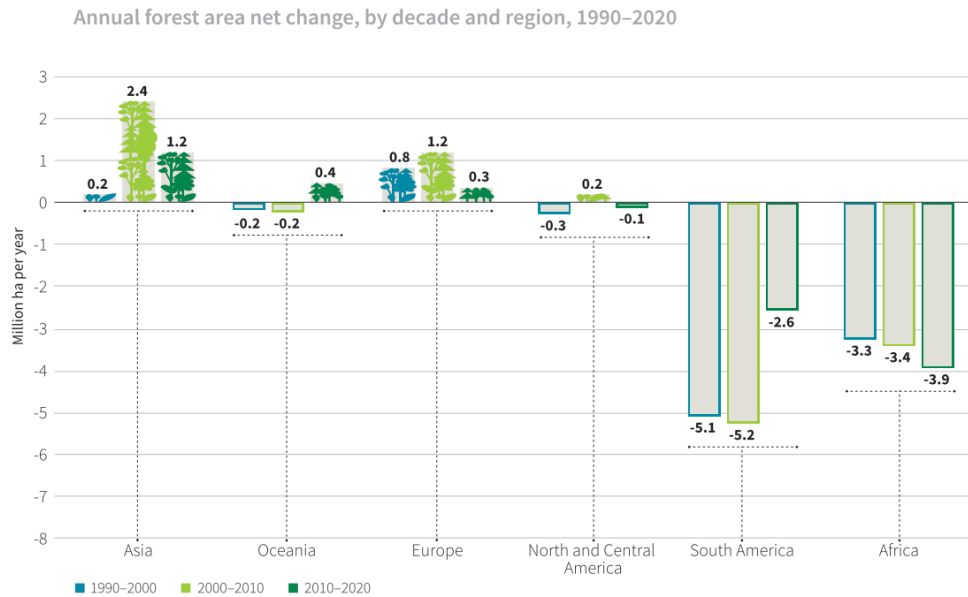


Figure 1. Annual forest area net change, by decade and region, 1990–2020

Source: (FAO, 2020a)

This loss of natural forest directly impacts carbon sequestration: global forest carbon stocks decreased between 1990 and 2020 from 668 Gt to 662 Gt (FAO, 2020b).

Given these prospects and the need for wood as a raw material for various industries such as furniture, construction, paper and fuel, the task of the forestry sector is to ensure that the extraction of timber products produced by natural forests is conducted under management and conservation schemes. Likewise, because the regeneration of natural forests is relatively slow with growth rates of approximately 2 m³/ha/year, it is necessary to increase forest plantations which, under improvement programs, optimize the planting of desired species and the application of silvicultural treatments, enabling them to supply a greater percentage of the timber needed by industry. In addition, they provide other ecosystem services such as wildlife habitats, conservation, and carbon sequestration, vital for mitigating anthropogenic climate change (Dash *et al.*, 2019; Thiffault *et al.*, 2021).

Colombia is a country with a biodiversity that places it among the 17 most megadiverse countries on the planet: "It is the first most biodiverse country per square kilometer in the world, the second most biodiverse in natural resources, and the sixth with the greatest water wealth on the planet". Colombia

ranks first in birds and orchids; second in the greatest variety of plants, amphibians, butterflies, and freshwater fish; third in the world with the most palms and reptiles; fourth in mammals: and fifth in marine and continental ecosystems"(DANE, 2021).

Table 1. Total forest carbon stock, by region and subregion, 1990–2020

Region/subregion	1990	2000	2010	2020
Eastern and Southern Africa	30 932	29 642	27 978	26 250
Northern Africa	2 338	2 242	2 190	2 090
Western and Central Africa	61 005	58 253	55 745	52 546
Total Africa	94 274	90 137	85 913	80 886
East Asia	27 110	30 261	33 908	37 907
South and Southeast Asia	45 804	43 792	43 071	41 468
Western and Central Asia	4 180	4 511	4 959	5 358
Total Asia	77 093	78 564	81 938	84 733
Europe excl. Russian Federation	31 625	34 260	36 833	39 192
Total Europe	158 744	162 457	168 069	172 442
Caribbean	1 552	1 783	1 977	2 098
Central America	4 988	4 617	4 270	4 069
North America	136 644	137 730	139 324	139 951
Total North and Central America	143 184	144 131	145 572	146 118
Total Oceania	33 338	33 111	33 077	33 063
Total South America	161 765	154 917	147 917	144 846
WORLD	668 399	663 316	662 485	662 088

Source: (FAO, 2020b)

However, due to the high rate of deforestation, the situation in Colombia is of great concern with respect to other countries in the region. The recent Global Forest Resources Assessment (FRA)

Colombia report indicates that an average of 199,285 hectares of natural forest have been lost per year. See Table 1 (FAO, 2020b).

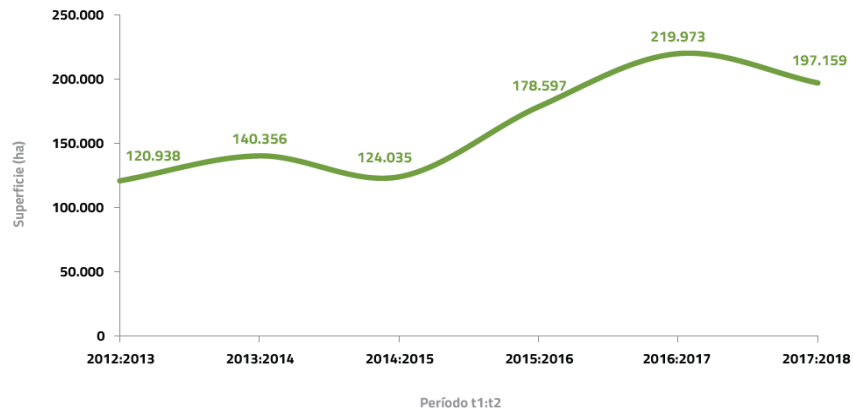


Figure 2. Deforested area (hectares) 2012 - 2018

Source: (DANE, 2021)

Contrary to what the country needs, the area of plantations established annually has decreased. While in 2012 there was an increase of 35,388 new hectares of planted forests, by 2018 forest plantations barely increased by 10,075 hectares (ha). See Figure 2.

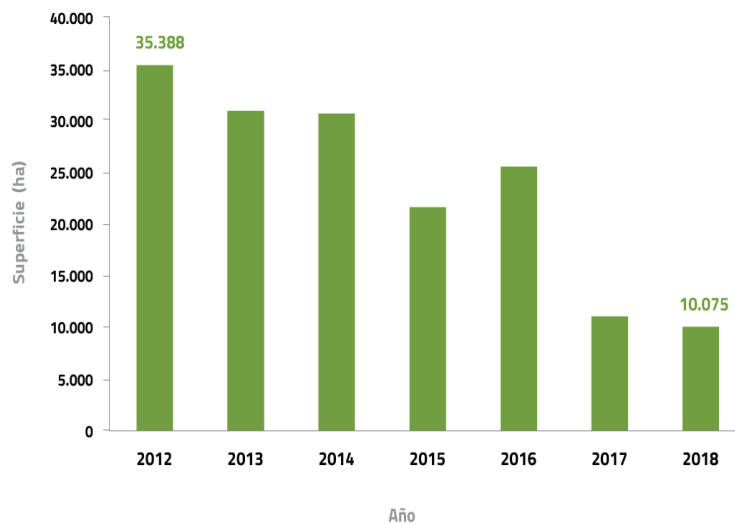


Figure 3. Area of commercial plantations established annually (a). 2012-2018

Source: (DANE, 2021)

In the PND 2018 - 2022 "Pact for Colombia, Pact for Equity", the need to achieve a balance between conservation and production is proposed. Under the slogan "Conserve by producing and produce by conserving", it seeks to implement actions to make the forestry sector more productive and to mitigate the environmental impact caused by the exploitation of natural forests through the strengthening of research, public management, and dialogue and environmental education of the communities.

Because forestry plantations are long-term crops, farmers, owners of land suitable for forestry, and investors who expect short-term profitability are discouraged from investing in the sector.

To make the forestry sector more attractive, it is necessary to increase technical knowledge, especially of those species that, due to their rapid growth and yield, can attract investment. This includes planning with the help of yield and growth models and, as an added value, the periodic quantification of carbon sequestration within the simulation, as a technical basis for the issuance and marketing of carbon credits or bonds which would provide additional periodic profitability.

In the Forestry Statistical Bulletin which dictates the policies of the Directorate of Agricultural and Forestry Chains of the Ministry of Agriculture, we highlight the commercial forestry species as of June 2019, laying out the number of hectares per area and per species ([Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019](#)).

Among the promising species in Colombia, the University of Tolima has been working on the technological package of the forest species *Gmelina arborea* Roxb. This tropical species was introduced into Colombia more than 20 years ago and is currently considered one of the most promising in forest production, not only for its rapid growth, but also for the quality of its wood and excellent adaptation. In different Colombian Regions, it has been possible to reduce harvesting periods for this species to less than 10 years in Bolívar and Magdalena on the Atlantic coast, in Casanare, Vichada and Meta, in the Orinoquía, in Urabá Antioqueño, in the middle Magdalena and in the inter-Andean valleys of the Cauca and Magdalena rivers (departments of Valle, Tolima and Huila).

The purpose of this study is to model and simulate the growth and yield of the promising species *Gmelina arborea* Roxb, including the calculation of biomass and CO₂ equivalent for a one hectare stand.

For the simulation, data from the four measurements of permanent plots of the forest species *Gmelina arborea* Roxb. located in the department of Tolima, was used. Based on the information available, and

as a strategy for planning, we consider it necessary to model and simulate the growth and yield of this species, which allows for the projection and quantification of production, and also to determine the conditions necessary to achieve the desired objectives.

Table 2. Species of Commercial Forest Plantations as of June 2019

Species of Commercial Forest Plantations as of June 2019					
Species	High suitability zones UPRA				
	Caribe	Eje Cafe- tero	Orinoquía	Others	Total
Other Pines	83	62.127	45.669	4.691	112.570
<i>Pinus patula</i>	12	62.531	1.000	11.860	75.403
Native species	24.851	24.357	2.827	21.740	73.775
Other Eucalyptus	13.965	8.136	35.128	11.851	69.081
<i>Acacia mangium</i>	15.387	8.236	40.357	1.672	65.652
<i>Eucalyptus grandis</i>	1	42.054	75	7.661	49.791
<i>Tectona grandis</i>	20.187	22.518	1.849	3.935	48.490
Introduced species	238	17.331	20.327	4.155	42.051
<i>Gmelina arborea</i>	24.605	4.256	197	958	30.017
N.c.p	295	862	213	1.939	1.939
Grand Total	99.898	251.842	148.291	68.737	568.769

Source: (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019)

MATERIALS AND METHODOLOGY

The forest species *Gmelina arborea* Roxb belongs to the Verbenaceae family which presents fast growth. It is a deciduous species in dry areas. It can reach 30 m in height and grow to more than 80 cm in diameter. It usually grows with a clean shaft of 6 to 9 m and with a conical crown, wide in open places, but in plantations, its crown is dense and compact (Rojas Rodríguez *et al.*, 2004). It is one of the species with high yield potential and among the ten forest species with the greatest commercial influence in the country. This is especially due to advances in silvicultural management and

genetic improvement. The great advantage of this species lies in its rapid growth and its strength to withstand severe periods of drought, without its quality for the furniture industry being diminished (Onyekwelu *et al.*, 2003). The methodology of this study has four sequential phases (Figure 4).

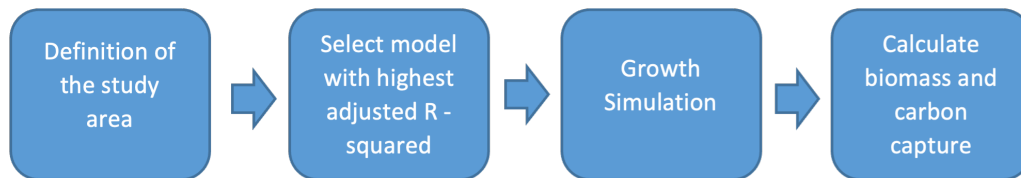


Figure 4. Description of the methodology.

Study area

The study was conducted with information from plots located in the region of Tolima, in the municipalities of Armero Guayabal (grounds of the University of Tolima, Granja de Armero: Centro Universitario Regional del Norte - CURDN), Coello (Finca El Neme), and Guamo (Finca Arizona, the Bellavista path).

The data used in this work come from 4 periodic measurements on 31 permanent sampling plots of the *Gmelina arborea* Roxb. species, which are part of the set of monitoring plots on the growth and yield of the promising species in the region of Tolima.

The sowing date of the plantations oscillates between the years 1997 and 2008.

For the study, measurements taken between the years 2009 to 2015 were considered, including coordinates of each of the trees. In this way, spatial information was available to help calculate the distance-dependent competence indices.

The circular plots installed have areas of 0.05 and 0.08 ha, with radii 12.5 and 16m respectively, which are on flat land.

31 plots containing a total of 5802 trees measured in the study area were measured four times. The variables measured were age (years), stem quality, stratification, angle and distance of the trees in the circular plots, normal diameter (at 1,30 m height), total height, commercial height, and in the last measurement, crown radius. The following were calculated: number of trees per hectare, basal area per hectare, mean square diameter, dominant height, and site index.

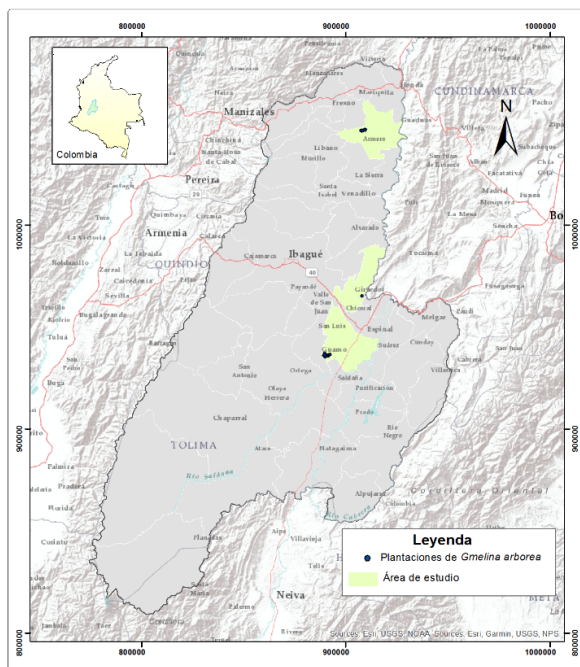


Figure 5. Municipalities with *Gmelina arborea* Roxb plantations in the region of Tolima which were part of this study.

Source: University of Tolima.

	Age	DN	HT	HC	IS
count	2649	2649	2649	2649	2649
mean	6,04977	14,80409	12,28924	6,37487	21,14
std	3,47227	6,07392	5,58264	3,70966	2,33
min	1,46	1,6	2,07	0	16,03
25 %	3,21	10,4	7,8	3,48	19,20
50 %	4,9	13,9	10,7	5,04	21,50
75 %	8,15	18,7	16,8	9,45	23,00
max	16,29	45,1	42	41	24,60

Table 3. Summary of tree and mass variables in the last measurement.

Legend: DN: normal diameter (cm), HT: total height (m), IS: Site index, HC: canopy height (m), Age: age (years).

Normal section models:

Using the field measurements of the permanent plots, a normal section growth model can be created to model the plantation (CONIF, 2011).

The growth of a tree does not only depend on the species or quality of the seed, there are many factors that can affect or stimulate the growth of the plantation: quality of the site, age of the tree, density, and intensity of the competition exerted by the trees that surround it for resources such as water, light, and nutrients (Álvarez-Taboada, Barrio-Anta, Gorgoso Varela, & Álvarez-González, 2003).

Therefore, an individual tree diameter growth model must take all these factors into account. For this reason, three linear models were proposed that incorporate the variables measured in the field: age, normal diameter, number of trees, the calculation of the site index from the measured heights, and the projection of the density per hectare.

The first model includes age (t), diameter (d), and site index (SI) to calculate diameter growth (delta diameter - ΔD). (Equation (1)).

$$\Delta D = a_1 + a_2 \cdot t + a_3 \cdot d + a_4 \cdot IS \quad (1)$$

The second model includes the period between measurements (Δt), through which the diameter delta was calculated. (Equation (2)).

$$\Delta D = a_1 + a_2 \cdot t + a_3 \Delta t + a_4 \cdot d + a_5 \cdot IS \quad (2)$$

The third model includes the natural logarithm of the measured and calculated variables (Álvarez-Taboada *et al.*, 2003). (Equation (3)):

$$\ln(\Delta D) = a_1 + a_2 \cdot \ln(t) + a_3 \ln(\Delta t) + a_4 \cdot \ln(d) + a_5 \cdot \ln(IS) \quad (3)$$

Equation for modeling:

$$\ln(\Delta D) = a_1 + a_2 \cdot \ln(t) + a_3 \ln(d) \quad (4)$$

Growth simulation:

According to Peng (2000) two basic approaches have been used for modelling forest growth: an empirical approach with which the yield and growth of forest plantations are modeled and a mechanistic approach such as process models.

In this work, the empirical approach will be used to build the models and the simulation. For the simulation, the initial diameters were generated based on the distribution found in the plots of one year according to the stratification (sociological position) made during the measurement. The height is calculated with Equation (5), parameterized by multiple linear regression, from the data of age and diameter of the tree, obtained in the measurements.

$$\ln(HT) = a_1 + a_2 \cdot \ln(Ed) + a_3 \cdot \ln(DN) \quad (5)$$

Where HT - total height, Ed- age, DN- normal diameter, ai- parameters to adjust.

As the objective of the simulation (Fransson *et al.*, 2020) is to determine the diameter and volume of wood at the time of final harvest, as well as the equivalent carbon sequestration in biomass, the maximum density that a stand can reach before thinning (Gezan *et al.*, 2007) is a restriction, which is achieved by comparing the SDI value (Equation (6)) with the SDI_{max} (Equation (7)). To comply with the restrictions at the time of modeling, the year and intensity of two thinnings before total harvesting must be taken as parameters (Kuehne *et al.*, 2022).

In the current study case, the index chosen is the density index, which employs the variables: number of trees per hectare N, mean square diameter of the plantation Dg, and a constant "b" defined by Reineke in 1933, with a value of -1,605 for several species. The index thus corresponds to the number of trees per hectare that a specific stand could reach if its average square diameter was 25 cm, as expressed in Equation (6) (Arias Aguilar, 2004).

$$SDI = N * \left(\frac{25}{Dg} \right)^b \quad (6)$$

The maximum value of the Stand Density Index (SDI_{max}), indicating the maximum level of competition, and thus frequently used as an indicator of the stand's upper load limit, can be obtained (Navarro Cárcamo *et al.*, 2011). Equation (7):

$$SDI_{max} = 10^{a_{Max}} * 25^b \quad (7)$$

These indices will be calculated in a Python script and considered as constraints in the simulation. According to the results obtained in the work of Ramos and Niño (2017) to calculate the volume of the tree, the equation formulated by Schumacher and Hall (1933) was the model with the best results:

$$v = \beta_1 * d^{\beta_2} * H^{\beta_3} - e \quad (8)$$

The simulation includes the calculation of: section area of each tree at breast height from the Normal Diameter given in meters (DN/100) - A (Equation (9)), the basal area of the plot - G (Equation (10)), where n is the number of trees in the plot), number of trees per hectare - N (Equation (11), where a_p is the area of the plot) and the quadratic mean diameter - d (Equation (12)):

$$A = \pi * \left(\frac{DN}{100 * 2} \right)^2 \quad (9)$$

$$G = \sum_{i=1}^n A \quad (10)$$

$$N = \frac{10000}{a_p} \sum_{i=1}^n 1 \quad (11)$$

$$d = \sqrt{\frac{40000 * G}{\pi * N}} \quad (12)$$

Carbon study

The weight or equivalent estimate of organic matter that exists in each forest ecosystem above and below ground is called forest biomass (Obando Bonilla, 2004). In this definition, it is understood that the ecosystem under study is the tree, which is subdivided for the purposes of biomass calculations into: stem mass, branches, leaves, bark, roots, litter, and dead wood; percentage shown in Table 4.

The total biomass for that year (Martins Silva *et al.*, 2019; Obando Bonilla, 2004) and their respective carbon capture (Rodríguez Santos, 2013), have to be periodically calculated. It is normally quantified in tons per hectare of green or dry weight. The biomass of the total tree is composed of the Below-ground Biomass and Aerial Biomass. The underground biomass is made up of the roots of the tree and the aerial biomass is made up of the biomass of the stem together with the biomass of branches, leaves, flowers, and fruits.

Two relationships used to calculate the total biomass: Biomass expansion factor (FEB)

$$FEB = AERIAL BIOMASS/TRUNK BIOMASS \quad (13)$$

And the ratio R between ground biomass and aboveground biomass

$$R = GROUND BIOMASS/AERIAL BIOMASS \quad (14)$$

For the calculation of the aerial biomass in the plantations of the tropical dry forests of the Department of Tolima, the following equation is used (Rodríguez Santos, 2013):

$$\text{Log}_{10}(B) = a_1 + a_2 \bullet \text{Log}_{10}(DAP) \quad (15)$$

Along with the following a_1 parameters = $-1,988 \pm 0,192$, $a_2 = 2,993 \pm 0,138$.

Determination coefficient $R^2 = 0,97$ y $CME=0,070$.

Thus, based on the study by [Rodríguez Santos \(2013\)](#), tree diameter can be related to biomass.

Likewise, the following distribution is obtained for this region ([Obando Bonilla, 2004](#)):

COMPONENT	CARBON %	BIOMASS %
Stem	43,13	63,87
Branches	41,39	16,35
Thin Root	41,75	4,38
Thick Root	42,55	12,43
Leaves	36,46	3,27
AVERAGE	41,39	100

Table 4. Percentage of average carbon by component and percentage that the component constitutes of the total biomass of *Gmelina arborea* Roxb trees.

To calculate the carbon captured or stored, the following relationship is used for the species:

$$CA = B \bullet FC \quad (44/12) \quad (16)$$

where: CA is the stored CO_2 , B is the biomass (underground, aerial or total) of the tree and FC are the carbon fraction for the species calculated at 42,497 (See Table 9).

RESULTS AND DISCUSSION

According to the equations suggested above, this section presents the results of the adjusted parameters through multivariable regression.

Variable	Parameter	coef	std err	t	P> t	R ²	R ² adjusted
Const	a_1	3,260	0,239	13,610	0,000	0,206	0.205
AGE	a_2	-0,232	0,011	-21,607	0,000		
DN	a_3	0,030	0,006	4,694	0,000		
IS	a_4	-0,042	0,011	-3,634	0,000		

Table 5. Results of the adjustment of the basic model of growth in section (Equation (1))

The results obtained in Table 5 show that this equation does not efficiently model tree diameter growth as shown by the R^2 and the adjusted R^2 . Since the diameter increase is being calculated and the periods between measurements are not equal, it was necessary to introduce the time difference between these measurements as an independent variable of the model.

Variable	Parameter	coef	std err	t	P> t	R ²	R ² adjusted
Const	a ₁	2,892	0,251	11,510	0.000	0.358	0.357
AGE	a ₂	-0,270	0,011	-23,892	0.000		
DeltaAGE	a ₃	0,674	0,029	23,267	0.000		
DN	a ₄	0,063	0,007	9,240	0.000		
IS	a ₅	-0,068	0,012	-5,717	0.000		

Table 6. Results of the adjustment of the model of growth in section (Equation (2))

This parameter is included in Equation (2) as shown in Table 6.

The previous models are valid because they work in the period of growth of the trees in the stand. The value of the R^2 and adjusted R^2 statistics show that Equation (2) represents the model better than Equation (1), although their values are not as expected. However, as growth behavior is not linear, a third model is implemented by changing the measured values by their natural logarithm.

Variable	Parameter	coef	std err	t	P> t	R ²	R ² adjusted
Const	a ₁	4,471	0,510	8,770	0.000	0.454	0.453
Ln(AGE)	a ₂	-1,741	0,045	-38,232	0.000		
Ln(DeltaAGE)	a ₃	0,717	0,032	22,102	0.000		
Ln(DN)	a ₄	0,894	0,063	14,221	0.000		
Ln(IS)	a ₅	-1,369	0,174	-7,881	0.000		

Table 7. Results of the adjustment of the model of growth in section (Equation (3))

Again, the statistics of Equation 3 exceed those obtained in Equation 2. However, it was expected that they would exceed the value 0.5 in the adjusted R^2 . Since this was not obtained, an analysis was made of the data with respect to those outliers that could influence the results obtained. As a result of the analysis, the data that were outside the confidence intervals were excluded, reducing the data

by 20 %. This is justifiable due to the irregular nature of the terrain, for example, trees that are close to water sources, and that continue to grow in periods of drought, unlike normal behavior, or those that are in shallow soils or on slopes where soil nutrients are scarce. With the new values, the following results are obtained:

Variable	Parameter	coef	std err	t	P> t	R ²	R ² adjusted
Const	a ₁	2,796	0,194	14,416	0,000	0,366	0.365
AGE	a ₂	-0,233	0,009	-25,708	0,000		
DN	a ₃	0,013	0,005	2,538	0,011		
IS	a ₄	-0,014	0,009	-1,441	0,150		

Table 8. Results of the adjustment of the basic model of growth in section (Equation (1))

During the analysis and simulation, the following was established: since the simulation is done annually and the logarithm of this periodicity would give 0. Given that the delta of the diameter with respect to age is what needs to be found, the natural logarithm of this ratio (DeltaD/DeltaAGE) was quantified. And, in this sense, Equation (3) was operated with the new data.

Variable	Parameter	coef	std err	t	P> t	R ²	R ² adjusted
Const	a ₁	2,716	0,289	9,398	0.000	0.633	0.633
Ln(AGE)	a ₂	-1,266	0,026	-49,188	0.000		
Ln(DN)	a ₃	0,347	0,035	9,825	0.000		
Ln(IS)	a ₄	-0,525	0,100	-5,225	0.000		

Table 9. Results of the adjustment of the model of growth in section (Equation (2))

In the simulation process, it is also evident that when representing a stand of one hectare, the site index does not vary. Therefore, it was analyzed to exclude it from the model according to equation (4), the results of the statistics show a non-significant difference of the R² adjusted with respect to Equation (3) (See Table 9 and Table 10).

Equation (5) was implemented to calculate the heights, and adjustments were made to the parameters shown in Table 11.

Biomass calculation

For the calculation of biomass, Obando Bonilla´s reseach (2004) on the same species in the North of Tolima was considered.

Variable	Parameter	coef	std err	t	P> t	R ²	R ² adjusted
Const	a ₁	1,246	0,067	18,589	0.000	0.628	0.628
Ln(AGE)	a ₂	-1,221	0,024	-49,940	0.000		
Ln(DN)	a ₃	0,271	0,032	8,368	0.000		

Table 10. Results of the height calculation adjustment (Equation (5)).

variable	Parameter	coef	std err	t	P> t	R ²	R ² adjusted
Ln(const)	a ₁	0,155	0,013	11,815	0,000	0,874	0,874
Ln(AGE)	a ₂	0,299	0,005	59,885	0,000		
Ln(DN)	a ₃	0,676	0,007	104,858	0,000		

Table 11. Results of the adjustment of the model of growth in section (Equation (4))

	FC	Biomass	Average	Root	Area
Stem	43,13	63,87	2754,7131		63,87
Branches	41,39	16,35	676,7265		16,35
Thin Root	41,75	4,38	182,865	4,38	
Thick Root	42,55	12,43	528,8965	12,43	
Leaves	36,46	3,27	119,2242		3,27
	41,056	100,3	4262,4253	16,81	83,49
		FC =	42,497	R =	0,20134148

Table 12. Biomass factor calculation

From the field measurements of one-year-old trees in the permanent plots, their mean and standard deviation were calculated. Based on these data the diameter values were randomly generated for the simulation of 1089 trees, equivalent to the approximate number of trees that fit in a stand of one hectare planted at 3 meters. In this way, the simulation is made from the given equations of volume (Equation (8)), height (Equation (5)), basal area of the tree (Equation (9)), biomass (Equation (11)), carbon capture and CO₂ equivalent (Equation (12)), diameter growth (Equation (4)) for each tree. With these data the basal area of the hectare G (Equation (10)), root mean square diameter d (Equation (12)), SDI (Equation (6)) are generated. The simulation is done at 12 years and includes

a thinning in year 3 and year 5 with an intensity of 40 %, as shown in Table 13. The simulation was created using Python.

Age	G (mt ² /ha)	N (Number of tress)	d (Cms)	SDI	V (mt ³ /ha)	CO ₂ _ha (Ton)
1	1,8214	1058	4,6818	37,7951	4,4681	2,3024
2	3,5888	1058	6,5719	74,1937	29,2202	19,8920
3	7,4069	1058	9,4413	152,5169	56,8395	40,9574
4	12,4554	899	13,2817	255,5116	82,8446	60,6567
5	18,2713	899	16,0865	374,0306	75,7326	57,6574
6	14,8875	494	19,5885	304,1003	90,9509	68,9885
7	17,5289	494	21,2554	357,7343	69,1763	53,4572
8	18,5667	469	22,4510	378,6848	77,6879	59,5823
9	17,3360	399	23,5203	353,4036	85,6810	65,1962
10	18,2749	399	24,1488	372,4345	93,2272	70,3775
11	18,6980	399	24,4268	381,0582	100,3835	75,1881
12	19,1260	399	24,7047	389,6819	107,1964	79,6778

Table 13. Simulation results for the species in twelve years including two thinnings.

The results are shown graphically (Figures 6, 7, 8, and 9):

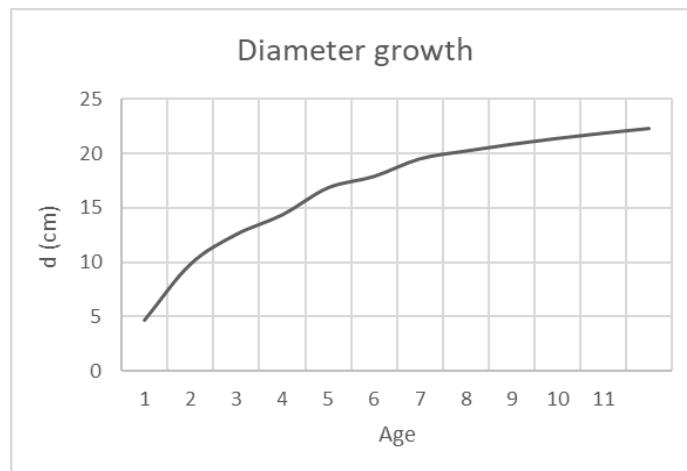


Figure 6. Diameter growth

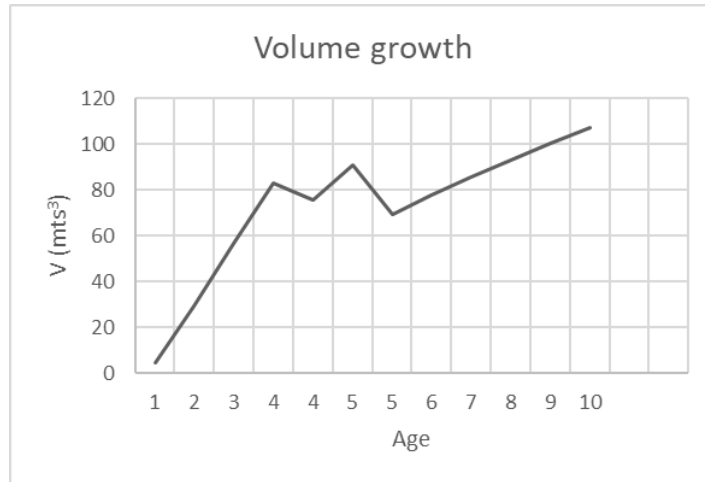


Figure 7. Volumen growth

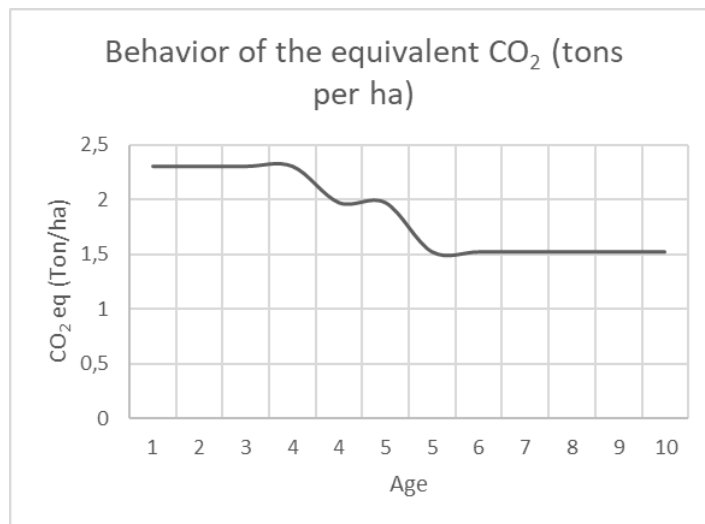


Figure 8. Behavior of the equivalent CO₂ (tons per ha)

CONCLUSIONS

Following the methodology described, it was possible to achieve the proposed objective, as the growth of the stand was simulated and at the same time the carbon captured for each period (one year) was calculated for the species *Gmelina arborea* Roxb. Although the adjusted growth model did not obtain a high Coefficient of Determination R^2 in the adjustment of the parameters, an accurate simulation was achieved.

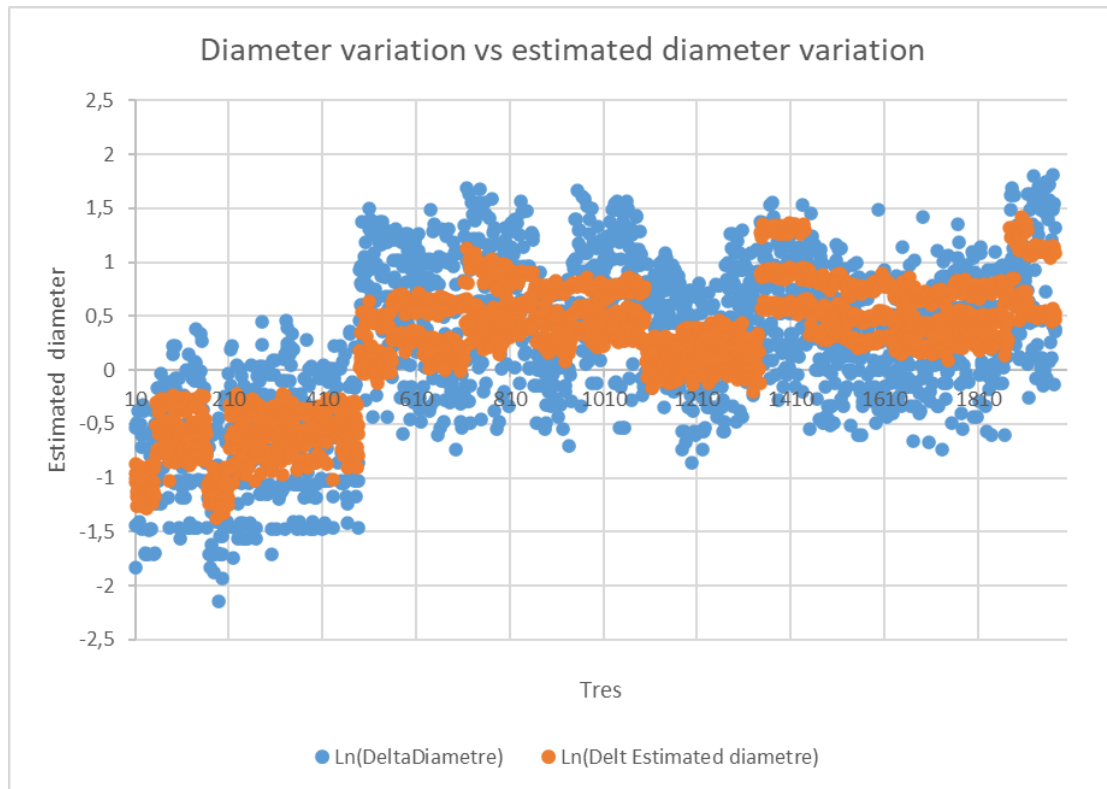


Figure 9. Diameter variation vs estimated diameter variation

The *Gmelina* is a promising species due to its rapid growth, behavior under competitive conditions, and extended use in the furniture and construction industries, as well as its contribution to mitigating natural forests and carbon sequestration.

Future research may include in the growth simulation process the explicit effect of silvicultural operations such as thinning and pruning, due to its important impact on the growth process when trees are overly sensitive to light and compete for limited resources.

In the same vein, future research can benefit from using computational intelligence techniques in growth models for forestry, as they allow addressing the non-linearity and recursiveness inherent in these processes. When indicators associated with competition between trees are included, these techniques can effectively capture their impact on growth, which is inherently conditioned by such factors..

FUNDING

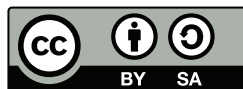
The work was supported by the Universidad del Tolima, which collaborated on the field measurements, and by the Universidad del Valle and Universidad Nacional, which provided the time of their researchers.

REFERENCES

- Álvarez-Taboada, M. F., Barrio-Anta, M., Gorgoso Varela, J. J., & Álvarez-González, J. G. (2003). Influencia de la competencia en el crecimiento en sección en *Pinus radiata* D. Don. *Invest Agrar: Sist Recur For*, 12, 25–35.
- Arias Aguilar, D. (2004). Validación del Índice de Densidad del Rodal para el manejo de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. en el trópico. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 1, pp. 1–6. Retrieved from <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N>.
- CONIF. (2011). Monitoreo y modelamiento del crecimiento para el manejo de plantaciones forestales comerciales.
- DANE. (2021). Cuenta ambiental y económica de Bosque. Retrieved from https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/cuentas_ambientales/cuentas-residuos/Pt-Cuenta-Residuos-2016p.
- Dash, J. P., Moore, J. R., Lee, J. R., Klápště, J., & Dungey, H. S. (2019). Stand density and genetic improvement have site-specific effects on the economic returns from *Pinus radiata* plantations. *Forest Ecology and Management*, 446(January), 80–92. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.003>.
- FAO. (2020a). Global Forest Resources Assessment 2020 - Key findings. In Global Forest Resources Assessment 2020. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca8753en>.
- FAO. (2020b). Global Forest Resources Assessment 2020 - Main report. In *Global Forest Resources Assessment 2020*. <https://doi.org/10.4324/9781315184487-1>.

- Fransson, P., Franklin, O., Lindroos, O., Nilsson, U., Brännström, Å., & For Res, C. J. (2020). A simulation-based approach to a near optimal thinning strategy-allowing for individual harvesting times for individual trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(3), 320–331. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0053>.
- Gezan, S. A., Ortega, A., & Andenmatten, E. (2007). Diagramas de manejo de densidad para renovales de roble , raulí y coigüe en Chile Stocking management charts for roble , raulí and coigüe second growth forests in Chile. *Bosque*, 28(2), 97–105.
- Kuehne, C., McLean, J. P., Maleki, K., Antón-Fernández, C., & Astrup, R. (2022). A stand-level growth and yield model for thinned and unthinned even-aged Scots pine forests in Norway. *Silva Fennica*, 56(1), 1–21. <https://doi.org/10.14214/sf.10627>.
- Martins Silva, J. P., Marques da Silva, M. L., Ferreira da Silva, E., Fernandes da Silva, G., Ribeiro de Mendonça, A., Cabacinha, C. D., ... Fernandes, M. R. de M. (2019). Computational techniques applied to volume and biomass estimation of trees in Brazilian savanna. *Journal of Environmental Management*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109368>.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). Boletín Estadístico Forestal.
- Navarro Cárcamo, C., Herrera, M. A., Aranda, F. D., & Donoso, P. J. (2011). Stand density management diagram and its thinning applications in *Drimys winteri* second-growth forests in southern Chile | Diagrama de manejo de densidad y su aplicación a raleo en bosques de segundo crecimiento de *Drimys winteri* en el sur de Chile. *Bosque*, 32(2), 175–186. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002011000200008>.
- Obando Bonilla, D. (2004). Interceptación de la radiación, acumulación y distribución de biomasa y contenido de carbono en *Gmelina arborea* Roxb y *Pochota quinata* (Jacq) Dugand (Universidad del Tolima). Universidad del Tolima. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.015>.
- Onyekwelu, J. C., Biber, P., & Stimm, B. (2003). Thinning scenarios for *Gmelina arborea* plantations in south-western Nigeria using density management diagrams. *Food, Agriculture & Environment*, 1(2), 320–325.

- Peng, C. (2000). Understanding the role of forest simulation models in sustainable forest management. *Environmental Impact Assessment Review*, 20, 481–501. <https://doi.org/10.1016/S0195-925500044-X>.
- Ramos Molina, P. A., & Niño López, G. S. (2017). Modelamiento de atributos fustales y volúmenes comerciales de árboles de *Gmelina arborea* creciendo en del Departamento del Tolima.
- Rodriguez Santos, N. (2013). Guía para la cuantificación de biomasa y el carbono forestal, generación de modelos y uso de herramientas para su estimación.
- Rojas Rodríguez, F., Arias Aguilar, D., Moya Roque, R., Meza Montoya, A., Murillo Gamboa, O., & Marcela Gamboa, A. (2004). Manual para productores de melina *Gmelina arborea* en Costa Rica. In *Sistema de Información de los Recursos Forestales de Costa Rica (SIREFOR)*. Cartago. Retrieved from http://www.sirefor.go.cr/Documentos/Especies_plantaciones/MELINA/Manualparalosproductoresdemelina.pdf%5Cnhttp://www.sirefor.go.cr.
- Thiffault, N., Hoepfing, M. K., Fera, J., Lussier, J.-M., & Larocque, G. R. (2021). Managing plantation density through initial spacing and commercial thinning: yield results from a 60-year-old red pine spacing trial experiment. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(2), 879. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0126>



Propuesta de modelo para la implementación de herramientas logísticas en las empresas del Área Metropolitana de Centro Occidente (Risaralda, Colombia)

Proposal of a model for the implementation of logistics tools in the companies of the AMCO Risaralda (Colombia)

Mariana Losada Agudelo ¹, María Elena Bernal Loaiza ² y Diego Fernando Ordoñez Rosero ³

Fecha de Recepción: 29 de julio de 2022

Fecha de Aceptación: 4 de octubre de 2024


Cómo citar: M., Losada Agudelo, M., Bernal Loaiza y D., Ordoñez Rosero. Propuesta de modelo para la implementación de herramientas logísticas en las empresas del Área Metropolitana de Centro Occidente (Risaralda, Colombia). *Tecnura*, 28(79), 109-122. <https://doi.org/10.14483/22487638.19743>


Resumen

Objetivo: Proponer un modelo para la implementación de herramientas logísticas que permitan mejorar la competitividad en las empresas del Área Metropolitana Centro Occidente (AMCO), Risaralda (Colombia).

Metodología: Se presenta un tipo de investigación descriptiva con un muestreo no probabilístico a conveniencia con once empresas ubicadas en el AMCO, en Risaralda. Para proponer el modelo de implementación de herramientas logísticas, este trabajo está dividido en tres etapas: en la primera se analizan modelos que incluyen herramientas o variables logísticas que permitan mejorar la competitividad de las empresas; en la segunda se elabora un instrumento para determinar las herramientas logísticas utilizadas por las empresas, y en la tercera, se analiza la información y se presentan las características del modelo.

Resultados: Las empresas tienen claro la importancia de las herramientas logísticas en sus procesos; sin embargo, se evidencia que la utilización de estas es de forma independiente entre los procesos de las compañías (como planeación, aprovisionamiento/compras, producción, distribución y devolución), lo que puede influir en la optimización de la cadena de suministro. Por lo anterior, se propone un modelo integrador que permita sincronizar los procesos y responder a las demandas de los clientes con cantidades, tiempos y calidad adecuados, lo cual contribuirá a la mejora en la competitividad de las organizaciones.

¹Ingeniera industrial, magíster en Ingeniería de Producción. Docente de la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia . Email: mlosada@utp.edu.co

²Ingeniera de sistemas, magíster en Investigación de Operaciones y Estadística, magíster en Administración del Desarrollo Humano y Organizacional, estudiante Doctorado en Didáctica. Docente de la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia . Email: mbernal@utp.edu.co

³Ingeniero industrial, magíster en Administración. Docente de la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia . Email: dordonez@utp.edu.co

Conclusiones: Para responder a las demandas de los clientes cada vez más exigentes, las empresas deben involucrar e integrar todos los procesos desde la planeación hasta la distribución del producto bajo unas mismas directrices; además, tienen que efectuar un seguimiento continuo de la información para así identificar factores que afectan el costo del bien producido. En esta investigación, de las 11 empresas analizadas, solamente el 36,4 % utiliza las herramientas en sus procesos de forma integral.

Palabras clave: Herramienta logística, cadena de suministros, modelo, competitividad.

Abstract

Objective: Propose a model for the implementation of logistics tools to improve competitiveness in companies in the Western Central Metropolitan Area AMCO Risaralda (Colombia).

Methodology: A type of descriptive research is presented with a non-probabilistic sample for convenience with 11 companies from the AMCO Central Western Metropolitan Area in Risaralda. The process of the proposal of the implementation model of the tool, this work is divided into three stages. In the first stage is the analysis of models that include logistic tools or variables that allow for improving the competitiveness of companies; In the second stage, an instrument is developed to determine the logistics tools used by companies, and the third stage is the analysis and presentation of the information and the characteristics of the model.

Results: Companies are clear about the importance of logistics tools in their processes, however, the use of these independently between company processes such as (planning, supply/purchasing, production, distribution, and return) is evident, which can influence the optimization of the supply chain. Therefore, an integrating model is proposed that allows synchronizing processes and responding to customer demands with adequate quantities, times, and quality, which will contribute to improving the competitiveness of organizations.

Conclusions: To respond to the demands of increasingly demanding customers, companies must involve and integrate all processes from planning to product distribution under the same guidelines, in addition, to continuously monitoring the information that allows identifying factors that affect cost of the good produced. In this investigation of the 11 companies analyzed, only 36.4 % use the tools in their processes in an integral way.

Keywords: Logistics tool, supply chain, model, competitiveness.

Introducción

Para hacer frente a los retos complejos y cambiantes de un mundo globalizado, es necesario desarrollar capacidades de gestión y tener una visión global e integradora. Según [Porter \(1991\)](#), las empresas tienen como finalidad generar valor, mejorar oportunidades en la entrega de sus productos, reducir costos para obtener ventajas competitivas y lograr diferenciarse de la competencia. La gestión logística tiene un alto impacto en la efectividad de las organizaciones. Su optimización puede ayudar a reducir los costos operativos, a obtener mayores ganancias y a mejorar la posición competitiva ([Schneiderjans et al., 2013](#)).

La forma como las empresas realizan negocios se ve influenciada por la globalización, por lo que es vital considerar estrategias y repensar cómo se ejecutan los procesos. En este sentido,

la implementación de herramientas logísticas constituye un apoyo a la mejora del desempeño de toda la cadena de suministro.

La capacidad de adaptación de las empresas a través de herramientas logísticas es precisamente la que enmarca el problema abordado en este artículo; por tanto, se debe entender el contexto nacional y regional de las empresas, específicamente en el Área Metropolitana Centro Occidente (AMCO), en Risaralda. Allí se han ubicado empresas de diferentes sectores económicos dados los retos que deben enfrentar en cuanto a los cambios acelerados de la economía, así como su capacidad para continuar vigentes por medio de la mejora del desempeño de toda la cadena de suministros, a través de la implementación de herramientas logísticas que permiten desarrollar una visión global integradora y cómo estas han contribuido a las estrategias para permanecer de forma competitiva en el mercado.

Así, la investigación buscó responder a la pregunta: ¿cómo son las relaciones que se generan de la implementación de herramientas logísticas y la competitividad en las empresas del AMCO?

Fundamentos teóricos

Competitividad empresarial

Las organizaciones requieren de innovación y mejoramiento para responder de forma oportuna a las transformaciones constantes del ambiente y así asegurar su competitividad y éxito (Chiavenato, 2007).

La competitividad implica la existencia de un proceso dinámico de aprendizajes pasados, acciones presentes y planes futuros, donde se interrelacionan el desempeño de la empresa, los recursos que tiene para competir en el presente y sus habilidades para crear y desarrollar recursos futuros. (Horta *et al.*, 2015)

En su definición de competitividad, Oster (2000) afirma que es la capacidad que posee una empresa para fabricar bienes con patrones de calidad específicos, usando de forma eficiente sus recursos, en comparación con empresas semejantes; produciendo de una manera coherente y beneficiosa aquellos productos que cumplen con los requerimientos de un mercado abierto en términos de costes, precios, calidades, etc. (Mancha Navarro *et al.*, 2016).

Para Rubio y Aragón (2008), la competitividad es la capacidad que tiene una empresa para obtener una posición favorable respecto a otras, que le permite actuar de manera superior ante sus rivales. Esta competitividad, que busca captar recursos y mercado, se mide según la participación relativa de la empresa en el mercado o su rentabilidad (Lall *et al.*, 2005).

Según las consideraciones anteriores, la naturaleza de la competencia está determinada por cómo los clientes valoran las ofertas y cómo los accionistas valoran el potencial de ganancias en

relación con los competidores. Como resultado, la organización y sus competidores se esfuerzan constantemente para igualar y mejorar sus capacidades, ofertas y potencial para aumentar el nivel de valor para clientes y accionistas (Feurer y Chaharbaghi, 1994).

Logística

De acuerdo con [Cure et al. \(2006\)](#), la logística puede definirse como

el proceso de planificación, desarrollo y control eficiente del flujo de materiales, productos e información desde el lugar de origen hasta el de consumo, de manera que se satisfagan las necesidades del consumidor, recuperando el residuo obtenido y gestionando este de tal manera que sea posible su reintroducción en la cadena de suministro, obteniendo un valor añadido y/o consiguiendo una adecuada eliminación de este. (p. 186)

Según [Pinheiro de Lima et al. \(2017\)](#),

la logística tradicional se refiere a actividades como embalaje, transporte, carga, descarga y almacenaje, etc. Además, la logística moderna reafirma el concepto de gestión de logística integrada y su implementación. Es importante resaltar que la logística moderna debe ser entendida como el medio para la adquisición, la producción y la operación de todo el proceso hasta la entrega al consumidor. (p. 266)

Finalmente, de acuerdo con el Council of Supply Chain Management Professionals ([CSCMP, 2013](#)), la logística es la parte de la administración de la cadena de suministros que planea, implementa y controla la efectividad y eficiencia del flujo y almacenamiento de bienes y servicios, al igual que la información relacionada, entre el origen y el punto de consumo, con la finalidad de satisfacer los requerimientos del consumidor (p. 117).

Cadena de suministros

La cadena de suministros puede entenderse como todas las actividades involucradas en la entrega de un producto, desde la materia prima hasta el cliente, incluyendo el suministro de materias, manufactura y ensamble, almacenamiento y seguimiento de inventarios, administración de órdenes de entrada y salida, distribución a través de todos los canales, entrega al consumidor y el sistema de información necesario para monitorear todos los procesos ([Lummus et al., 2001](#); [Lummus y Vokurka, 1999](#)).

De acuerdo con el [CSCMP \(2013\)](#),

la cadena de suministro une a muchas empresas en conjunto, el material y los intercambios de información en el proceso logístico que se extiende desde la adquisición de las materias primas hasta la entrega de productos terminados al usuario final;

fabricantes, vendedores, proveedores de servicios y los clientes son los eslabones de la cadena de suministro.

El manejo de la cadena de suministros enfatiza en las interacciones de la logística que tienen lugar entre las funciones de marketing, logística y producción en una empresa, y las interacciones entre empresas dentro del canal de flujo del producto (Ballou, 2004, p. 5). Por otro lado, busca las oportunidades para mejorar el costo y el servicio al cliente, mediante la coordinación y la colaboración entre los miembros de la cadena de suministros.

La cadena de suministro puede entenderse como una red de organizaciones que están involucradas a través de relaciones entre los diferentes procesos y actividades que producen valor en forma de producto o servicio entregados al consumidor final (Mentzer *et al.*, 2001). De esta forma, se busca la eficiencia conjunta de cada eslabón de la cadena (aprovisionamiento, producción y distribución) para lograr una mayor competitividad.

La logística y su relación con la competitividad

La dinámica de la globalización de las economías ha obligado a las empresas a rediseñar las formas tradicionales de realizar procesos y negocios. Dentro de estos, la logística ha surgido como una herramienta de apoyo para mejorar el desempeño, lo cual hace necesario revisar su importancia dentro de las organizaciones.

De acuerdo con Gómez Acosta *et al.* (2013), “el estado de la logística y de la gestión de las cadenas de suministro constituye un soporte para trazar estrategias de desarrollo, tanto a nivel del sector empresarial como en la formación de profesionales” (p. 212). En ese mismo estudio, se demuestra cómo, a través de un modelo logístico y redes de valor, es posible caracterizar a las compañías en las respectivas temáticas, identificando las condiciones de las empresas cubanas, así como una guía para trazar estrategias para su desarrollo.

La logística de operaciones está en la base de la actividad productiva de la empresa, y se acerca a la meta de la competitividad empresarial. Si se acepta como cierto que la función productiva es la clave de la competitividad empresarial –pues es la responsable de la satisfacción de las prioridades competitivas–, deberá aceptarse entonces que el puente necesario es el de la logística de operaciones, así se determinan las funciones de aprovisionamiento, operaciones y distribución como las más importantes de la actividad logística (Aguirre y Rodríguez, 2007).

En América Latina y el Caribe, a pesar de las mejoras experimentadas en los últimos años, persisten problemas estructurales logísticos que suponen un freno a las exportaciones de las pymes de la región. Los países muestran diferencias notables; por tanto, cualquier generalización presenta excepciones. Entre los principales problemas logísticos que enfrentan las pymes en la región de las Américas se encuentran varias deficiencias. Estas incluyen carencias en educación y formación en logística, limitaciones para acceder a mejores prácticas, tecnologías y metodologías que mejoren la gestión de la cadena de suministro, dificultades para acceder a

servicios logísticos avanzados y la falta de herramientas de colaboración para alcanzar escalas de tamaño que permitan competir globalmente. (Kirby y Brosa, 2011).

Metodología

Para el diseño de la investigación, de acuerdo con Tamayo (2004), existen dos tipos de diseño dentro de las etapas de investigación: bibliográfico y de campo. El primero se utiliza en los preliminares y desarrollo de la investigación, y el segundo, en el trabajo de campo. En este caso se consideran ambos tipos, y cada uno toma mayor relevancia según la fase de la investigación.

El tipo de investigación desde la perspectiva de Méndez Álvarez (2006), se puede clasificar como descriptiva, debido a que una parte del proceso implica caracterizar las organizaciones como campo de estudio, analizando los datos obtenidos mediante un instrumento de recolección de información.

Para el proyecto, el universo está conformado por las empresas ubicadas en el AMCO en Risaralda, considerando dentro de estas, sus gerentes, propietarios y líderes de logística. De esta forma se obtiene un contexto completo de la situación actual de las empresas, así como la evidencia de la implementación de herramientas logísticas y el impacto de estas dentro del desarrollo de la empresa. Con relación al muestreo, este es realizado por un método no probabilístico: a conveniencia, considerando la facilidad de acceso a la información y la disponibilidad de las empresas para participar de la muestra dentro del tiempo de duración de la investigación.

Durante la realización del trabajo, como primer paso se efectuó una revisión bibliográfica de modelos que incluyen herramientas o variables logísticas que permitan mejorar la competitividad de las empresas. A partir de esto se establecieron las herramientas que fueron consideradas para evaluar dentro de la región; posteriormente se construyó un instrumento para determinar las herramientas logísticas utilizadas en las organizaciones de la región AMCO. Por último, se analizó cómo estas herramientas han contribuido con su capacidad de mantenerse competitivas en el mercado. Lo anterior facilitó proponer un modelo de herramientas logísticas integrado que mejorara la competitividad de las empresas.

Resultados

Para la gestión logística y de cadena de suministro se han identificado modelos que permiten analizar las características que poseen las empresas en sus procesos y encontrar áreas de mejora en las organizaciones, lo que a su vez redundaría en competitividad, y optimización de la cadena de suministro y un incremento del nivel de servicio al cliente.

En este sentido, se reconoce que la coordinación de las actividades en la cadena de suministros, desde los proveedores a los clientes, promete una ventaja competitiva significativa que

se traduce en mayores ingresos y ahorros en los costos; la coordinación de estas actividades depende de una comunicación exitosa de las metas de la organización, su desempeño y los objetivos de la cadena de suministro entre los socios de la cadena (Stephens, 2001).

Entre los modelos desarrollados, se encuentra el de referencia de operaciones de la cadena de suministro versión 5.0 (*supply chain operations reference* [SCOR]), el cual identifica y define a través de métricas las mejores prácticas y tecnología de las organizaciones; analiza cinco procesos de gestión: planificación, aprovisionamiento, manufactura, distribución/entrega y devolución; incluye elementos de satisfacción de la demanda, desde los pronósticos y pedidos, hasta el fin del proceso con la emisión y pago de la factura final (Stephens, 2001).

Con la aplicación del modelo SCOR, se busca identificar las mejores prácticas y tecnologías relevantes para optimizar la cadena de suministros; sin embargo, este modelo y herramientas, fueron consideradas bajo la estructura estable de las empresas, es decir, empresas grandes con una estructura formal y con conocimientos técnicos aplicados a sus procesos.

De acuerdo con lo anterior, se analiza el modelo de gestión logística propuesto por Cano *et al.* (2015), el cual propone una alternativa para las pequeñas y medianas empresas, al integrar las cuatro áreas consideradas importantes para un buen desempeño logístico, a través de un control de variables que pueden mejorar la gestión logística mediante el uso de herramientas necesarias para ello.

El modelo de gestión logística para pymes se distingue del diseñado para grandes empresas. Las diferencias radican en los recursos tecnológicos, la estructura organizacional y la cultura operativa de las pymes, que son menos complejos en comparación con los altos niveles de capacitación y los abundantes recursos económicos disponibles para las grandes empresas (Velásquez, 2003), (Cano *et al.*, 2015).

El modelo de Cano *et al.* (2015) considera los flujos de información que se dan en la organización, donde establece que una interrelación débil entre las áreas implica una desintegración del sistema y genera un reto para aumentar la competitividad; por consiguiente, se enfoca en cuatro de las áreas importantes en la gestión de las pymes, así como en las herramientas necesarias para incrementar el desempeño logístico de la cadena de suministro. Este modelo busca ofrecer una solución integral a través del control de las variables que favorecen la gestión de la logística.

En el área del AMCO de Risaralda, aunque se encuentran algunas grandes empresas, predominan las pymes. Según Acopi Centro Occidente, las micro, pequeñas y medianas empresas representan un 94 % del tejido empresarial en Risaralda, y de ese porcentaje es generado el 84 % de empleo de la región.

En este trabajo se considera, por ende, la integración de elementos de los dos modelos (SCOR [Stephens, 2001] y Cano *et al.* [2015]), de forma que se puedan evaluar la mayor cantidad de herramientas logísticas dentro de los diferentes procesos de las organizaciones, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Relación entre herramientas logísticas y procesos

Herramientas logísticas/ Procesos	Logística interna/ flujos de información	Logística externa/ flujos de información	Administración de demanda	Cumplimiento de entregas al cliente	Estandarización de procesos	Control de inventarios	Costos del bien producido	Gestión de retornos/ garantías
Planeación	X	X	X	X	X	X	X	X
Aprovisionamiento /Compras	X	X	X	X	X	X	X	X
Producción	X		X	X	X	X	X	X
Distribución	X	X	X	X	X	X	X	X
Devolución	X	X			X	X		X

Nota: elaborada a partir de [Cano et al. \(2015\)](#) y [Stephens \(2001\)](#).

En este sentido, se crea un instrumento que permita recolectar información sobre la utilización de herramientas logísticas en empresas de la región que son consideradas competitivas de acuerdo con su capacidad de mantenerse activas en el mercado.

Descripción del instrumento

Se implementó un instrumento de recolección de información en la que se consideró una muestra de 11 empresas de la región (6 del sector de manufactura, 2 farmacéuticas, 1 importadora, 1 del sector servicios y 1 del sector de alimentos), las cuales fueron seleccionadas por un muestreo a conveniencia, con la posibilidad de acceso a la información y la disposición para participar en el estudio. El instrumento se diseñó a través de preguntas con enfoque cualitativo, que se agruparon de forma que fuera posible identificar las herramientas logísticas presentes en las organizaciones definidas en el modelo integrado: logística interna/ flujos de información, logística externa/ flujos de información, administración de demanda, cumplimiento de entregas al cliente, estandarización de procesos, control de inventarios, costos del bien producido, gestión de retornos/ garantías.

Gracias a la aplicación del instrumento, se logró establecer dentro de las organizaciones cómo la utilización de herramientas logísticas, trabajadas en el modelo integrado SCOR- [Cano et al. \(2015\)](#), como parte de los diferentes procesos, pueden dar respuesta a las exigencias de los clientes, lo que les permite adaptarse a los cambios y necesidades del mercado. Con lo anterior, es posible determinar cómo la utilización e integración de las herramientas logísticas en los procesos de las empresas puede influir en la competitividad. Las empresas en la región tienen claro que las cadenas de suministro las conforman diferentes eslabones; sin embargo, el uso de herramientas logísticas se ha limitado a áreas de compras, producción y distribución, y ha dejado a un lado las de planeación y devoluciones, con una menor integración de estas estrategias. Entonces, se presentan barreras que no facilitan un flujo para satisfacer las necesidades de los clientes, lo que puede generar sobrecostos, quejas frecuentes e ineficiencia en términos de inventarios, flexibilidad y confiabilidad.

De acuerdo con [Vásquez \(2011\)](#), la desintegración de la logística dentro de los procesos de las organizaciones genera un rezago frente al mercado; por eso, esta es un factor clave de competitividad para afrontar los problemas mediante la planeación soluciones eficientes apoyadas en herramientas logísticas.

Las herramientas logísticas contribuyen a la coordinación de los diferentes procesos de las organizaciones de forma que puedan responder con calidad, cantidad y en el tiempo oportuno a los requerimientos de los clientes, factores que son claves al momento de enfrentar mercados altamente competitivos y cambiantes, donde los consumidores son cada vez más exigentes al momento de adquirir un producto o servicio. En este sentido, “la logística debe considerarse como un esfuerzo integrado para lograr la satisfacción del cliente al costo más bajo; la desintegración de la logística en las compañías las rezaga en la competencia del mercado” ([Vásquez, 2011, p. 86](#)).

Con la aplicación del instrumento en las empresas del AMCO se evidenció el uso de herramientas logísticas dentro de los procesos de las organizaciones; sin embargo, esas herramientas no están siendo implementadas de forma coordinada bajo el concepto de *cadena de suministros*, por el contrario, son trabajadas de forma individual en los diferentes procesos, sin coordinación con los demás eslabones de la cadena. Esto se evidenció en el porcentaje de empresas que utilizan de forma integral estas herramientas en la totalidad de sus procesos: 36,4 %. En la tabla 2 se detalla el porcentaje de empresas que utiliza cada herramienta.

Tabla 2. Uso de herramientas logísticas por las empresas

Logística interna/ flujos de información	Logística externa/ flujos de información	Administración de demanda	Cumplimiento de entregas al cliente	Estandarización de procesos	Control de inventarios	Costos del bien producido	Gestión de retornos/ garantías
72,7 %	86,4 %	90,9 %	63,6 %	63,6 %	90,9 %	63,6 %	100 %

Se entiende, entonces, que las empresas utilizan herramientas logísticas para responder a necesidades específicas y de forma reactiva en los procesos. Su uso, de forma integral dentro de la cadena de suministros, permitiría una optimización de la respuesta a las demandas de los clientes, así se mejora su competitividad. Una logística eficiente y accesible constituye un elemento clave para que las organizaciones, especialmente para que las pymes puedan competir de forma exitosa en un contexto de globalización ([Kirby y Brosa, 2011](#)).

Lo anterior demuestra que las empresas tienen claro la necesidad de las herramientas logísticas en sus procesos; sin embargo, existen barreras que se evidencian en su utilización de forma independiente en los procesos; esto genera enfrentamientos entre proveedores y clientes, demoras/incumplimientos en las entregas, baja calidad en los bienes y servicios, insatisfacción en la cadena total, variaciones o altos inventarios, que se traducen en altos costos. El estado actual de la aplicación de las herramientas logísticas en las empresas puede ilustrarse como en

la figura 1, donde falta de integración entre procesos por medio del uso de estas herramientas.



Figura 1. Estado actual de la logística

Considerando la logística como parte de los procesos estratégicos que contribuye a satisfacer las necesidades de los clientes, [Castellanos \(2009\)](#) plantea que La importancia de la logística radica en la necesidad de mejorar el servicio a un cliente, optimizando la fase de mercadeo y transporte al menor costo posible; algunas de las actividades que pueden derivarse de la gerencia logística de una empresa son las siguientes:

- Aumento en líneas de producción.
- La eficiencia en producción, alcanzar niveles altos.
- La cadena de distribución debe mantener cada vez menos inventarios.
- Desarrollo de sistemas de información.

Estas pequeñas mejoras en una organización se traducirán en los siguientes beneficios:

- Incrementar la competitividad y mejorar la rentabilidad de las empresas para acometer el reto de la globalización.
 - Optimizar la gerencia y la gestión logística comercial nacional e internacional.
- [...]
- Ampliación de la visión gerencial para convertir la logística en un modelo, un marco, un mecanismo de planificación de las actividades internas y externas de la Empresa. (p. 6)

Por consiguiente, se propone un modelo integrado, como se muestra en la figura 2, de las herramientas logísticas dentro de los principales procesos de la organización, que permita sincronizar los procesos y responder a las demandas de los clientes con cantidades, tiempos y calidad adecuada, lo cual contribuirá a la mejora en la competitividad de las organizaciones.

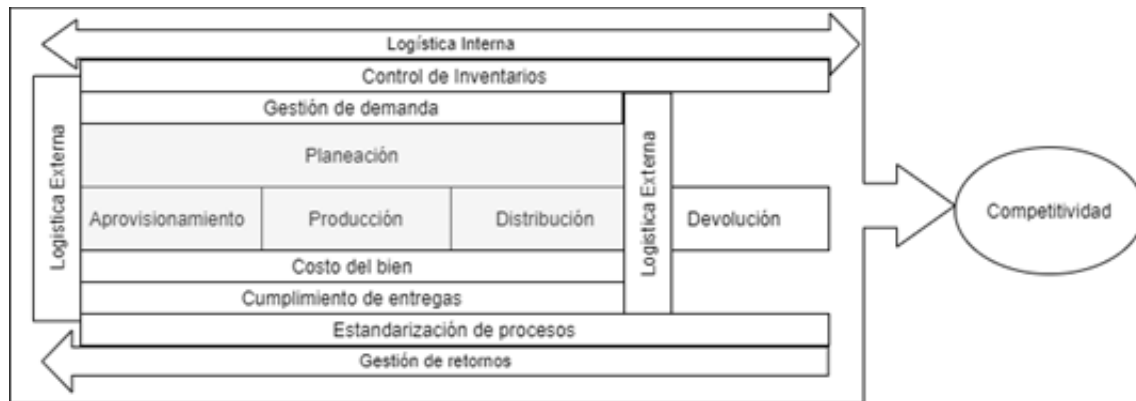


Figura 2. Propuesta de modelo integrado de las herramientas logísticas en los procesos de las organizaciones

El modelo propuesto está conformado por cinco procesos de las organizaciones: planeación, aprovisionamiento, producción, distribución y devolución, integrados con la utilización de las herramientas logísticas, trabajando en conjunto y de forma coordinada, las herramientas de logística interna se presentan como un flujo transversal de información, además el proceso de devolución se integra a los demás. La implementación de herramientas dentro de los procesos permite una mejor coordinación y comunicación para cumplir con las necesidades de los clientes (costo del bien y cumplimiento de entregas), lo cual se traduce en competitividad que les permite a las pymes tener la capacidad de sobresalir y permanecer en el mercado.

Conclusiones

Por medio de la revisión de literatura se logró integrar dos modelos que han sido implementados para evaluar la utilización de las herramientas logísticas en las organizaciones; con esta integración es posible medir el uso de estas herramientas tanto para empresas grandes y altamente estructuradas, cómo para las pequeñas y medianas del Área Metropolitana de Centro Occidente (AMCO) en Risaralda.

En la práctica, las empresas suelen implementar herramientas logísticas de manera reactiva ante las demandas del mercado. Sin embargo, esta implementación tiende a ser parcial y se limita a procesos específicos, lo que resulta en una falta de integración que limita la eficiencia en la gestión de la cadena de suministros. A pesar de estos desafíos, el uso incompleto de las herramientas logísticas no ha impedido que las empresas se mantengan competitivas, aunque no siempre puedan responder a tiempo a las demandas del mercado.

Adicionalmente, los resultados de la recolección de información permitieron identificar factores que afectan el costo del bien producido: los costos asociados a la no calidad del producto/servicio que ocasionan desperdicios y reprocesos, los procesos ineficientes debido a la falta

de estandarización de forma que se pueda realizar un control constante para identificar causas de la no calidad y que permitan optimizar los procesos a través de un seguimiento continuo.

Adicionalmente, los resultados de la recolección de información permitieron identificar factores que afectan el costo del bien producido: los costos asociados a la no calidad del producto/servicio que ocasionan desperdicios y reprocesos, los procesos ineficientes debido a la falta de estandarización de forma que se pueda realizar un control constante para identificar causas de la no calidad y que permitan optimizar los procesos a través de un seguimiento continuo.

Por otro lado, se evidencia la necesidad de involucrar e integrar todos los procesos desde la planeación hasta la distribución del producto, bajo unas mismas directrices y mediante un seguimiento de la información para coordinar toda la cadena; de esta manera se reconocen cuellos de botella y su optimización, por medio de una relación cliente/organización/proveedor estructurado, y con una evaluación continua para validar que se esté cumpliendo con los requerimientos del cliente.

Financiamiento

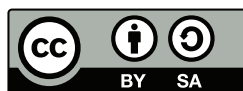
Este trabajo es resultado del proyecto de investigación “Diseño de metodología para la construcción de políticas públicas en logística departamental”, avalado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Tecnológica de Pereira con código 9-20-7.

Referencias

- Aguirre, D. M. C. y Rodríguez, A. J. U. (2007). Logística de operaciones: integrando las decisiones estratégicas para la competitividad. *Ingeniería Industrial*, 28(1), 57-61.
- Ballou, R. H. (2004). *Logística: administración de la cadena de suministro*. Pearson.
- Cano Olivos, P., Orue Carrasco, F., Martínez Flores, J. L., Mayett Moreno, Y. y López Nava, G. (2015). Modelo de gestión logística para pequeñas y medianas empresas en México. *Contaduría y Administración*, 60(1), 181-203. [https://doi.org/10.1016/S0186-1042\(15\)72151-0](https://doi.org/10.1016/S0186-1042(15)72151-0)
- Castellanos, A. (2009). *Manual de la gestión logística del transporte y la distribución de mercancías*. Ediciones Uninorte. https://www.academia.edu/24339874/manual_de_gestion_logistica_del_transporte_distribucion_de_mercancias
- Chiavenato, I., (2007). *Introducción a la teoría general de la administración*. McGraw-Hill.
- Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP). (agosto de 2013). *SCM. Terms and Glossary*. https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx

- Cure Vellojín, L., Meza González, J. C. y Amaya Mier, R. (2006). Logística inversa: una herramienta de apoyo a la competitividad de las organizaciones. *Ingeniería y Desarrollo*, (20), 184-202.
- Feurer, R. y Chaharbaghi, K. (1994). Defining competitiveness: A holistic approach. *Management Decision*, 32, 49-58.
- Gómez Acosta, M. I., Acevedo Suárez, J. A., Pardillo Báez, Y., López Joy, T. y Lopes Martínez, I. (2013). Caracterización de la logística y las redes de valor en empresas cubanas en perfeccionamiento empresarial. *Ingeniería Industrial*, 34(2), 212-226.
- Horta, R., Azua, S., Camacho, M. y Astrigarraga, M. (2015). Los procesos de innovación al interior de las empresas. Competitividad e innovación en la industria manufacturera en el Uruguay. *CTS: Revista Iberoamericana de Ciencia Tecnología y Sociedad*, 10(28), 23-49.
- Kirby, C. y Brosa, N. (2011). La logística como factor de competitividad de las pymes en las Américas. Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- Lall, S., Albaladejo, M. y Mesquita, M. (2005). *La competitividad industrial de América Latina y el desafío de la globalización*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID); Instituto para la Integración de América Latina y el Caribe (Intal).
- Lummus, R. R. y Vokurka, R. J. (1999). Defining supply chain management: A historical perspective and practical guidelines. *Industrial Management & Data Systems*, 99(1), 11-17.
- Lummus, R. R., Krumwiede, D. W. y Vokurka, R. J. (2001). The relationship of logistics to supply chain management: Developing a common industry definition. *Industrial Management & Data Systems*, 101, 426-431.
- Mancha Navarro, T., Moscoso Durán, F. y Santos, J. L. (2016). *La difícil medición del concepto de competitividad: ¿qué factores afectan a la competitividad regional?* Documento de Trabajo n.º 03. Instituto Universitario de Análisis Económico y Social (IAES), Universidad de Alcalá.
- Méndez Álvarez, C. (2006). *Metodología: diseño y desarrollo del proceso de investigación con énfasis en ciencias empresariales*. Limusa.
- Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D. y Zacharia, Z. G. (2001). Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 1-25.
- Oster, S. M. (2000). *Análisis moderno de la competitividad*. (Trad. G. M. Staines). University Press Oxford.

- Pinheiro de Lima, O., Breval Santiago, S., Rodríguez Taboada, C. M. y Follmann, N. (2017). Una nueva definición de la logística interna y forma de evaluar la misma. *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, 25(2), 264-276.
- Porter, M. E. (1991). *La ventaja competitiva de las naciones*. Vergara.
- Rubio, A. y Aragón, A. (2008). Recursos estratégicos en las pymes. *Revista Europea de Dirección y Economía de La Empresa*, 17(1), 103-126.
- Schniederjans, M. J., Cao, Q. y Triche, J. H. (2013). *E-commerce operations management*. World Scientific Publishing Company.
- Stephens, S. (2001). Supply chain operations reference model, version 5.0: A new tool to improve supply chain efficiency and achieve best practice. *Information Systems Frontiers*, 3, 471-476. <https://doi.org/10.1023/A:1012881006783>
- Tamayo, M. (2004). *El proceso de la investigación científica*. Limusa.
- Vásquez Ruiz, J. A. V. (2011). Logística y competitividad en Colombia. *Páginas: Revista Académica e Institucional de la UCPR*, (90).
- Velásquez Contreras, A. (2003). Modelo de gestión de operaciones para pymes innovadoras. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, (47), 66-87.



Aspectos tectónicos en la génesis de la Formación La Quinta y su relación con los depósitos minerales de cobre en la serranía del Perijá, Colombia

Tectonics aspects in the genesis of the La Quinta Formation and its relationship with the copper mineral deposits in the Perija Mountain Range, Colombia

Deyvid Tamara Roncancio ¹, Elías Rojas Martínez ², Luis Quintero López ³, Frank Lascarro Navarro ⁴ y Dino Carmelo Manco Jaraba ⁵

Fecha de Recepción: 3 de mayo de 2023

Fecha de Aceptación: 4 de octubre de 2024

Cómo citar: D. Tamara, E. Rojas, L. Quintero, F. Lascarro, D. Manco. Aspectos tectónicos en la génesis de la Formación La Quinta y su relación con los depósitos minerales de cobre en la serranía del Perijá, Colombia. *Tecnura*, 28(79), 123-139. <https://doi.org/10.14483/22487638.20824>

Resumen


Objetivo: Esta investigación tiene como objetivo determinar la relación genética y tectónica de la Formación La Quinta y las mineralizaciones de cobre que hospeda.

Metodología: Se efectuó un muestreo aleatorio simple probabilístico al segmento volcánico de la Formación La Quinta, del que se seleccionaron 14 especímenes que fueron analizados por la técnica geoquímica ICP-MS.

Resultados: Se evidenció que las rocas de la Formación La Quinta presentan una afinidad calcoalcalina, que varían de metaluminosas a peraluminosas, con enriquecimiento de elementos de tierras raras, característicos de ambiente genético de arco continental.


Conclusiones: Las rocas volcánicas de la Formación La Quinta contienen tendencias negativas de hierro-titanio y positiva de sodio-potasio al incrementar el SiO₂, lo que sugiere que provienen de un mismo pulso magmático con cristalización fraccionada. Las anomalías negativas de niobio, itrio, titanio, rubidio, lantano, torio y estroncio, indican procesos de fusión parcial de magmas en márgenes convergentes.

Palabras clave: cobre, Formación La Quinta, geoquímica ICP-MS, Serranía del Perijá, volcanismo.

¹Ingeniero geólogo. Fundación Universitaria del Área Andina. Valledupar, Colombia. . Email: 1999deyvid@gmail.com

²Geólogo, M. C. en Geología Económica. Fundación Universitaria del Área Andina. Valledupar, Colombia. . Email: eliaser@hotmail.com

³Ingeniero agroindustrial, M. C. en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Fundación Universitaria del Área Andina. Valledupar, Colombia. . Email: lquintero34@areandina.edu.co

⁴Ingeniero geólogo. Fundación Universitaria del Área Andina. Valledupar, Colombia. . Email: frank.lascarro@unmsm.edu.pe

⁵Ingeniero de minas, M. C. en Gestión Ambiental y Energética en las Organizaciones. Docente ocasional, Universidad de La Guajira. Riohacha, Colombia. . Email: dcmancoj@uniguajira.edu.co

Abstract

Objective: The objective of this research is to determine the genetic and tectonic relationship of the La Quinta Formation and the copper mineralization it hosts.

Methodology: A simple random probabilistic sampling was carried out in the volcanic segment of the La Quinta Formation, selecting 14 specimens that were analyzed by ICP-MS geochemical technique.

Results: It was evidenced that the rocks of the La Quinta Formation present a calcoalkaline affinity, varying from metalluminous to peraluminous, with enrichment of rare earth elements, characteristic of continental arc genetic environment.

Conclusions: The volcanic rocks of the La Quinta Formation contain negative iron-titanium trends, and positive sodium-potassium trends with increasing SiO₂, suggesting that they come from the same magmatic pulse with fractional crystallization, the negative anomalies of niobium, yttrium, titanium, rubidium, lanthanum, thorium and strontium, indicate partial melting processes of magmas in convergent margins.

Keywords: Copper, Geochemistry ICP-MS, La Quinta Formation, Perija Mountain Range, Vulcanism.

Introducción

La Formación La Quinta aflora en el margen occidental y oriental de la Serranía del Perijá, suprayace la Formación Manaure e infrayace la Formación Río Negro y el Grupo Cogollo (Buchely *et al.*, 2010). Se correlaciona estratigráficamente con la Formación Girón en el macizo de Santander, y con la Formación La Quinta en los Andes de Mérida y en la cuenca de Maracaibo (Buchely *et al.*, 2010); por tanto, su edad corresponde al Triásico Tardío y Jurásico medio. Su ambiente de deposición es continental, asociado a la generación de sistemas de grabens al oeste de Gondwana, durante el rompimiento de Pangea (Gallagher y Tauvers, 1992).

La Formación La Quinta se subdivide en dos grandes segmentos: el A, constituido por intercalaciones de rocas volcánicas, piroclásticas y conglomerados, además en algunos sectores, con intrusiones de rocas hipoabisales. Mientras que el tope (segmento B) corresponde a rocas clásticas finas de tonalidades pardas, con intercalaciones esporádicas de tobas volcánicas ácidas (Buchely *et al.*, 2010).

Sus rocas volcánicas se caracterizan por el color violeta de riolitas, riodacita, dacitas y, en menor proporción, basaltos con texturas traquíticas, porfiríticas y ocasionalmente amigdaloides, los fenocristales más recurrentes son fragmentos de olivino y clinopiroxenos. Las riolitas y dacitas presentan texturas generalmente microporfirítica, porfirítica y en serie; los fenocristales son de cuarzo y en menor medida de plagioclasa. Las rocas piroclásticas corresponden a tobas de color pardo, compuestas por fragmentos líticos y vidrio volcánico; los fenocristales presentes son de cuarzo, sanidina, hornblenda y biotita (Rodríguez García y Obando, 2020).

En inmediaciones de la serranía del Perijá, tanto en el lado colombiano como en el venezolano (Rivera, 1994), se han identificado mineralizaciones de cobre restringidas únicamente a la Formación La Quinta. En el lado colombiano se han realizado estudios petrográficos a las

mineralizaciones de cobre ubicadas desde El Molino (La Guajira) hasta Codazzi (Cesar), las mineralizaciones han sido descritas por [Champetier de Ribes et al. \(1963\)](#) como de tipo impregnación, en las que se registran cobre nativo, sulfuros de cobre, carbonatos de cobre y óxidos de cobre, restringidos estrictamente al miembro sedimentario y algunos cuerpos volcánicos de la Formación La Quinta. Además, los mismos autores han definido como las zonas con mayor exposición de manifestaciones cupríferas a las localidades de San José-Quitafrió, El Seno, Zeppelin y El Ovejo (figura 1).

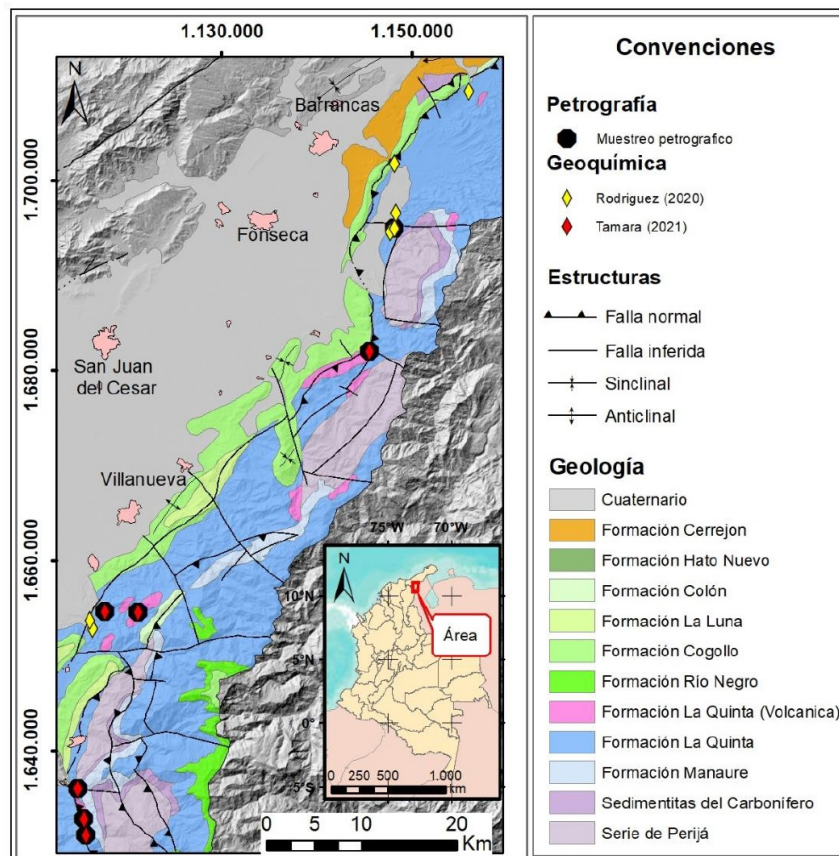


Figura 1. Localización del área de estudio

Metodología

Se realizó un seguimiento litoestratigráfico al segmento volcánico de la Formación La Quinta, del que se seleccionaron 14 muestras, 6 derivadas de la fase de campo y 8 correspondientes a la investigación de [Rodríguez García y Obando \(2020\)](#), expuestas en la superficie con un bajo a moderado grado de meteorización, con alteración y alejadas de zonas mineralizadas, siguiendo la metodología de [Jackson y Knaebel \(1934\)](#). Las muestras fueron sometidas a ensayos geoquí-

Tabla 1. Muestras recolectadas y su clasificación. Sistema de coordenadas Magna Colombia Bogotá

ID-Muestra	Coordenadas	
	Norte	Este
DMT-001	1654616	1117738
DMT-002	1654531	1121294
DMT-003	1635974	1114921
DMT-004	1632720	1115596
DMT-005	1631042	1115791
GR-6820	1682027	1145643
GR-6821	1681005	1144105
GOE-1045a	1701812	1148285
GOE-1045B	1701812	1148285
GR-6849	1694625	1147831
GR-6851	1709417	1156113
GR-6854	1652853	1116457
GOE-1048	1696644	1148433
GOE-1058	1653658	1116236

micos de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), realizados en el laboratorio Actlabs en Vancouver (Canadá), con el equipo Perkin Elmer Sciex ELAN 6000, 6100 o 9000 ICP/MS, ajustado mediante 10 calibradores sintéticos estándares antes y después de cada paquete de muestras.

Las muestras se ubican en dos sectores: el primero corresponde a la zona superior de la serranía del Perijá, específicamente desde la zona rural del municipio de Villanueva, hasta la zona rural del municipio de Barrancas, en La Guajira. El segundo corresponde a la zona inferior de la serranía del Perijá, que comprende el área desde la zona rural del municipio de Villanueva, departamento de La Guajira, hasta el corregimiento de San José de Oriente, municipio de La Paz en el departamento del Cesar. La recolección se efectuó mediante un muestreo probabilístico aleatorio simple (Sampieri Hernández *et al.*, 2014).

Resultados

Series magmáticas

La serie magmática a la que pertenecen las rocas volcánicas de la Formación La Quinta, según el diagrama AFM de Irvine y Baragar (1971), corresponde a calcoalcalina, con un enriquecimiento progresivo de álcalis y sin enriquecimiento de Fe y Ti, posiblemente por la temprana

generación de óxidos de Fe y Ti (figura 2a). Así mismo, en el diagrama de Ewart (1982) se grafican las muestras en los campos calcoalcalino y calcoalcalino de alto K (figura 2b), que registran un incremento de K_2O gradual al aumento de SiO_2 . Además, se aplica el diagrama de [Hastie et al. \(2007\)](#), donde la cantidad de Th al comportarse como un elemento inmóvil, indica altos contenidos de álcalis en las rocas, característica de serie calcoalcalina; sin embargo, los ejemplares GR-6820 y GR-6821 registran un contenido de Th mayor, lo cual indica una serie calcoalcalina rica en K o serie shoshonítica. Por su parte, el Co al tener afinidad a magmas básicos y una alta compatibilidad en olivinos y óxidos de Fe-Ti durante la cristalización fraccionada, refleja un empobrecimiento gradual, a medida que las rocas se van acidificando (figura 2c).

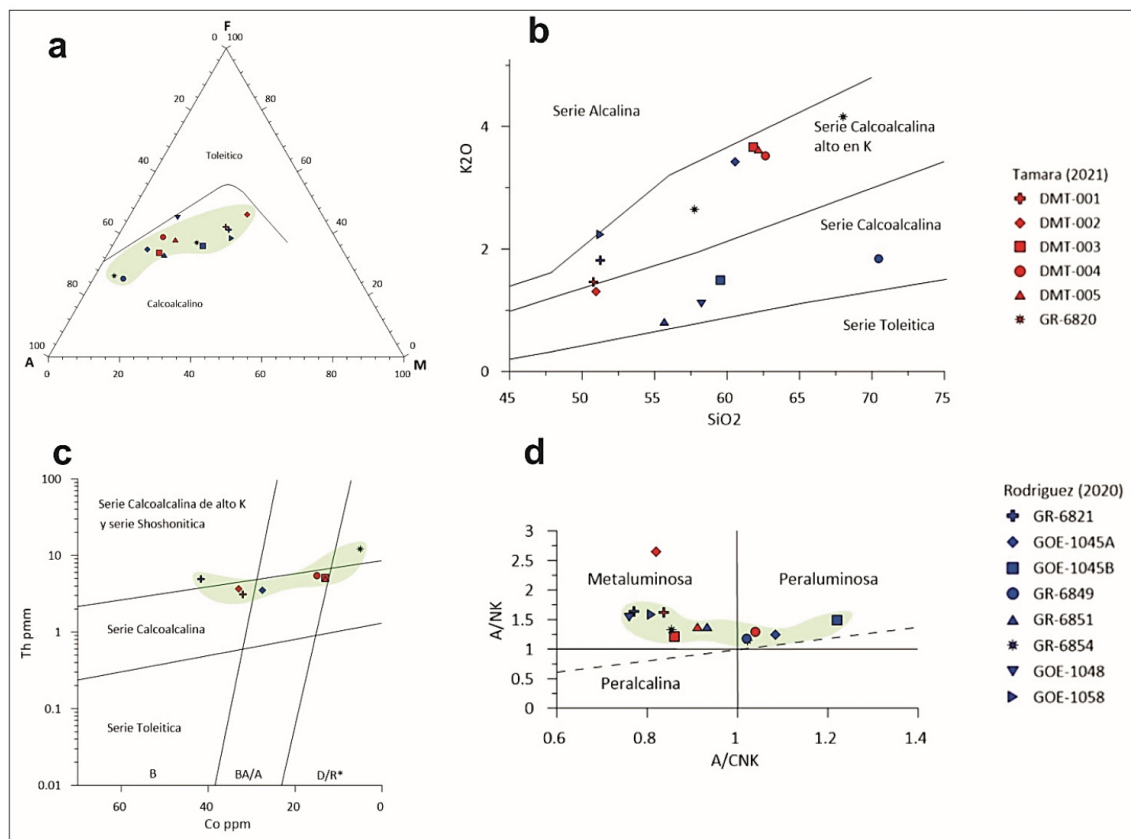


Figura 2. Diagramas de series magmáticas y alúmina

Nota: a) Diagrama de discriminación de series toleítica y calcoalcalina ([Irvine y Baragar, 1971](#)). b) Diagrama de discriminación geoquímica. c) Diagrama de discriminación Th-Co; B: basalto; BA/A: andesita basáltica y andesita; D/R*: dacita y riolita (*indica que las latitas y las traquitas también caen en este campo) ([Hastie et al., 2007](#)). d) Diagrama de clasificación Shand. Tomada de [Shand \(1927\)](#) y [Ewart \(1982\)](#).

Saturación de alúmina

El 64 % de las muestras son clasificadas como metaluminosas, cuyo contenido de Al_2O_3 es mayor a $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, pero menor a $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, de manera que, normalmente, predominan plagioclasas con un alto contenido cálcico, así como la notable presencia de hornblenda y biotita. A su vez, el 36 % de las muestras se clasifican como peraluminosas, cuyo contenido de Al_2O_3 es mayor a $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, generando corindón como mineral accesorio, además de micas y almandino (Shand, 1927) (figura 2d).

Diagramas de discriminación tectónica

Los datos geoquímicos sugieren una configuración tectónica de arcos volcánicos, debido a que las rocas de afinidad calcoalcalina se caracterizan por sus anomalías negativas de Nb, Y, Ti, y alto contenido de alúmina. En la figura 3a se observa un empobrecimiento en Nb e Y, exponiendo un declive continuo de Nb e Y, conforme las rocas se acidifican; estas anomalías negativas son características de arcos volcánicos y ambientes sincolicionales (Pearce y Cann, 1973).

Por otro lado, el diagrama Rb vs. Nb+Y de Pearce (1982) sugiere que el ambiente genético es de un arco volcánico (figura 3b), tomando como criterios principales la anomalía negativa general de Y+Nb y la presencia de altos contenidos de Rb, que es un elemento característico de zonas de subducción, debido a la contaminación cortical de los magmas procedentes de la fusión parcial de la corteza oceánica. Cabe resaltar que el Rb tiene un incremento conforme las rocas se acidifican, siendo las rocas pertenecientes a las serie calcoalcalina de alto K las que mayor contenido de Rb registran. Además, se confirma la configuración tectónica por medio del diagrama $(\text{La}/\text{Yb})_n$ vs. Sr/Y (figura 3c), y el diagrama Th/Yb vs. Nb/Yb (figura 3d) de Pearce y Peate (1995).

Diagramas de elementos tierras raras (REE) normalizadas

El diagrama de REE indica un enriquecimiento en elementos de las tierras raras livianas (LREE) y un empobrecimiento continuo en elementos de las tierras raras pesadas (HREE); además, algunos ejemplares presentan anomalías negativas de Nd características de magmas derivados de zonas de subducción. De igual manera, se observa un predominante enriquecimiento de La y empobrecimiento en Nb, conforme las rocas se acidifican (Sun y McDonough, 1989) (figura 4a).

El diagrama de los HFSE, REE y metales de transición evidencian en la totalidad de ejemplares volcánicos de la Formación La Quinta, anomalías negativas de Ta, Nb, Sr, V, Sc y Ti, mientras que muestran anomalías positivas de La y Nd (a excepción de GOE-1058). McDonough y Sun

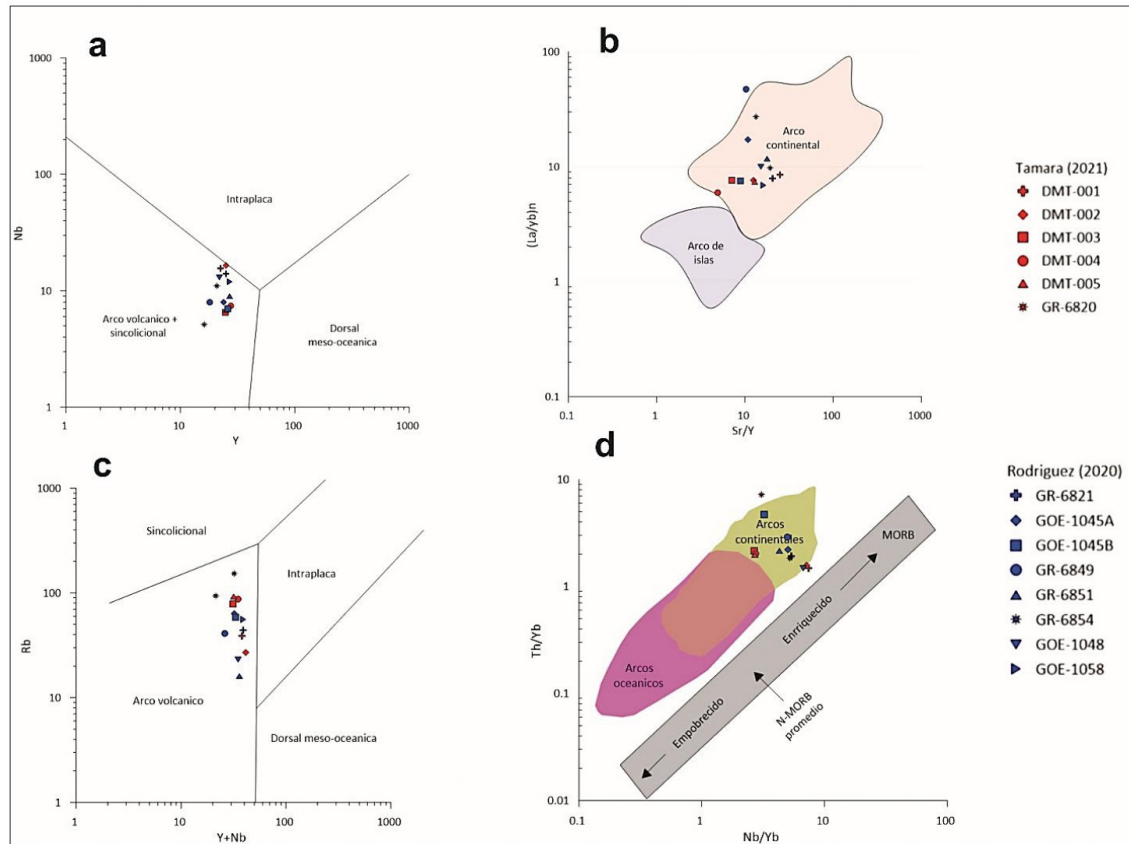


Figura 3. Diagramas de discriminación tectónica

Nota: a) y b) Diagrama de discriminación tectónica. c) Diagrama de configuraciones tectónicas (La/Yb)_n vs. Sr/Y (Condie y Kröner, 2013). d) Diagrama de la forma Th/Yb vs. Nb/Yb. Tomadas de Pearce *et al.* (1984), y Pearce y Peate (1995).

(1995) sugieren que la subducción de la corteza oceánica y su fusión puede producir anomalías negativas en los HFSE, en elementos como Ti, Nb y Ta en los magmas que se generan en los arcos volcánicos (figura 4b). Por su parte, Condie y Kröner (2013) señalan que las rocas volcánicas originadas en arcos continentales y en arcos oceánicos difieren por el enriquecimiento de los elementos de tierras raras ligeras en los arcos continentales, que se comportan en afinidades calcoalcalinas como elementos incompatibles.

En la figura 4b se observa que los elementos del La(n), Ce(n) y Sm(n) tienen concentraciones de entre 10 ppm y 100 ppm. Además, las rocas derivadas de arcos continentales se caracterizan por las anomalías negativas de Nb, Ta y Sr (figura 4b); así mismo, presentan un enriquecimiento positivo en la serie de elementos incompatibles desde Hf hasta Nb (figura 4b), características que sugieren que el ambiente de formación para las rocas volcánicas de la Formación La Quinta es un arco continental.

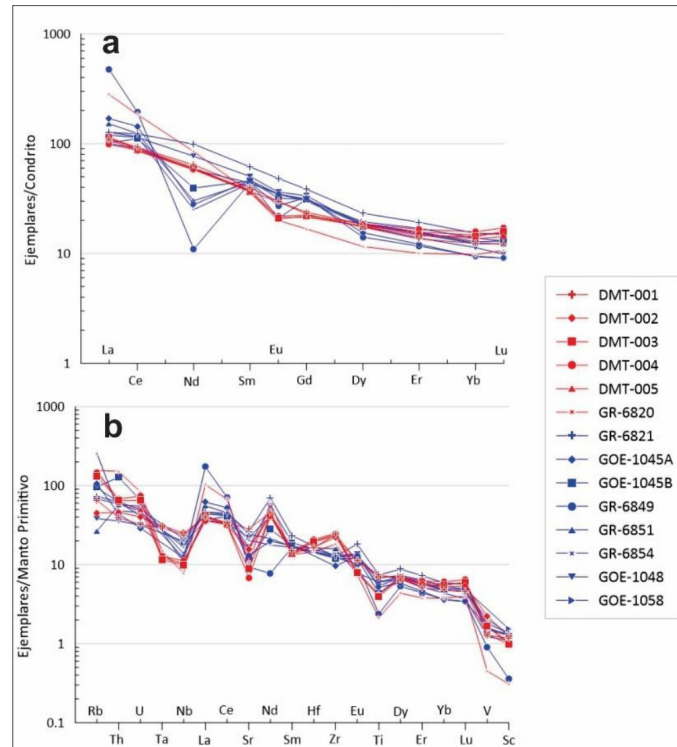


Figura 4. Diagramas tierras raras (REE) normalizadas

Nota: a) Diagrama de REE normalizado a condrito. b) Diagrama de REE normalizado a manto primitivo. Tomada de [McDonough y Sun \(1995\)](#) y [Sun y McDonough \(1989\)](#).

Modelo geotectónico

Las rocas volcánicas de la Formación La Quinta iniciaron su actividad volcánica en el Sine-muriense, durante el Jurásico inferior (196 Ma), finalizando en el Calloviense, Jurásico medio ([González Iregui et al., 2015](#); [Rodríguez García y Obando, 2020](#)) (164 Ma), por lo que la actividad volcánica es contemporánea con los cinturones ígneos jurásicos generados en Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela, como consecuencia de procesos de subducción de la placa Farallón ([Bayona et al., 2020](#)). En este sentido, todos los análisis geoquímicos realizados a las rocas ígneas de la Formación La Quinta presentados por [Rodríguez García y Obando \(2020\)](#) y esta investigación concluyen que el magmatismo generado es derivado de un arco continental. Sin embargo, la intercalación entre rocas volcánicas, piroclásticas y potentes litologías sedimentarias compuestas por clastos volcánicos procedentes de la misma formación, que decrece y cesa hacia el techo de La Quinta, indica procesos erosionales de consideración en la zona norte del bloque suramericano. Estos miembros de la Formación La Quinta suprayacen las rocas meta-sedimentarias de La Virgen, lo cual indica un ambiente de formación relativamente tranquilo

de llanuras intermareales, en cuencas limitadas por fallas normales, en las que predomina la configuración distensiva del protocaribe. Además, [Spikings *et al.* \(2015\)](#) consideran que la generación de cuencas intracontinentales son producto del retroceso de la zona de subducción y la apertura del protocaribe.

En este sentido, se plantea un modelo hipotético de subducción para la generación de magmas en la Serranía del Perijá durante el Jurásico, y su respectivo emplazamiento de las rocas volcánicas de la Formación La Quinta. En la figura 5a se observa el inicio del magmatismo en el Jurásico inferior, que es generado por la convergencia ortogonal de la placa Farallón. Como derivación de este proceso se extiende la cuenca retroarco y permite la depositación y cristalización de las rocas volcánicas y piroclásticas en la Formación La Quinta, intercaladas con estratos sedimentarios. En la figura 5b se ilustra la disminución del magmatismo hasta el punto de generar pequeñas cantidades de material piroclástico durante el Jurásico medio al superior, evidenciado por las finas intercalaciones de piroclásticos con potentes estratos sedimentarios en la parte superior de la Formación La Quinta; adicionalmente, las altas tasas de erosión facilitan el aporte de fragmentos volcánicos derivados del arco en las cuencas sedimentarias con una tasa de colmatación continua, lo que indica una pasividad tectónica durante este periodo en la Formación La Quinta.

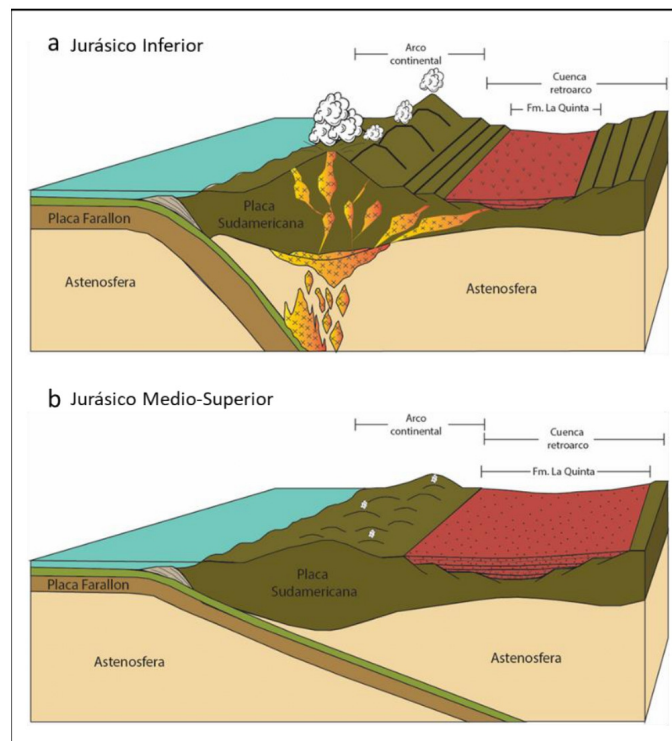


Figura 5. Esquema geotectónico de la Formación La Quinta

Fertilidad de magmas

La fertilidad de magmas en rocas volcánicas de arcos continentales y su relación con depósitos minerales se ha asociado con firmas geoquímicas adakíticas, que son producto de la hibridación de fusión parcial de basaltos metamorfoseados en la litosfera durante la subducción de la corteza oceánica relativamente joven (≤ 25 Ma), con la cuña mantélica peridotítica durante el ascenso del magma a superficie (Richards y Kerrich, 2007).

Las rocas volcánicas de la Formación La Quinta se caracterizan por tener en promedio un 58 wt % de SiO_2 , 15 wt % de Al_2O_3 ; 3,7 wt % de MgO , 328 ppm de Sr, 23 ppm de Y; 2,1 ppm de Yb; las rocas más básicas cuentan en promedio con 140 ppm de Ni, mientras que en las rocas intermedias y félsicas el promedio de Ni es de 30 ppm. Caso similar sucede para el Cr, donde las rocas básicas tienen un promedio de 185 ppm, mientras que para las rocas intermedias a ácidas cuentan con un promedio de 52 ppm, por su parte, los ratios de Sr/Y y La/Yb en promedio son de 14 y 19 respectivamente. Dadas las características anteriores, las rocas volcánicas de la Formación La Quinta no cumplen con todos los criterios geoquímicos de las firmas adakíticas; sin embargo, sus propiedades geoquímicas se relacionan con el cinturón magmático del Triásico tardío-Jurásico en Colombia (Richards y Kerrich, 2007), por tanto, presentan características geoquímicas que sugieren procesos notables de cristalización fraccionada.

En la figura 6a, se observa un empobrecimiento del ratio Sr/Y a medida que incrementa el Y, lo que sugiere fusión parcial de las peridotitas en la cuña mantélica y asimilación de agregados sedimentarios en la fuente magmática con ausencia notable de fusión parcial de la corteza oceánica y su transición a eclogitas en la zona de subducción. En consecuencia, se presenta una cristalización de plagioclasa temprana, enriqueciendo en "Y" los magmas intermedios y ácidos; por tanto, la plagioclasa cristalizada junto con hornblenda y piroxenos generan bajos ratios de Sr/Y (Defant y Drummond, 1990). En la figura 6b se ilustra un proceso de cristalización fraccionada típica de los arcos continentales normales, con un descenso continuo del ratio Sr/Y a medida que se acidifica la roca; así mismo, se observa que el Y permanece constante en rocas básicas a intermedias y presentan un fuerte empobrecimiento en rocas ácidas con valores menores a 18 ppm (figura 6c).

La relación entre La y Yb (figuras 6d-6f) registra generalmente dos tendencias: en el diagrama La/Yb vs. Yb (figura 6d), la mayoría de los datos presentan empobrecimiento continuo de Yb, a medida que incrementa el ratio de La/Yb; sin embargo, tres ejemplares (GOE-1045A, GR-6829 y GR-6849) registran un enriquecimiento considerablemente pronunciado del ratio La/Yb superior a las demás muestras. Estos tres ejemplares se caracterizan por ser rocas de composiciones químicas extremadamente evolucionadas, debido a su alto contenido de SiO_2 (figuras 6e, 6f), a pesar de tener ratios de La/Yb altos, no presentan los ratios Sr/Y requeridos para ser definidas como adakitas. Richards y Kerrich (2007) sugieren que las rocas con estas características indican procesos de contaminación cortical, lo que facilita la cristalización de pi-

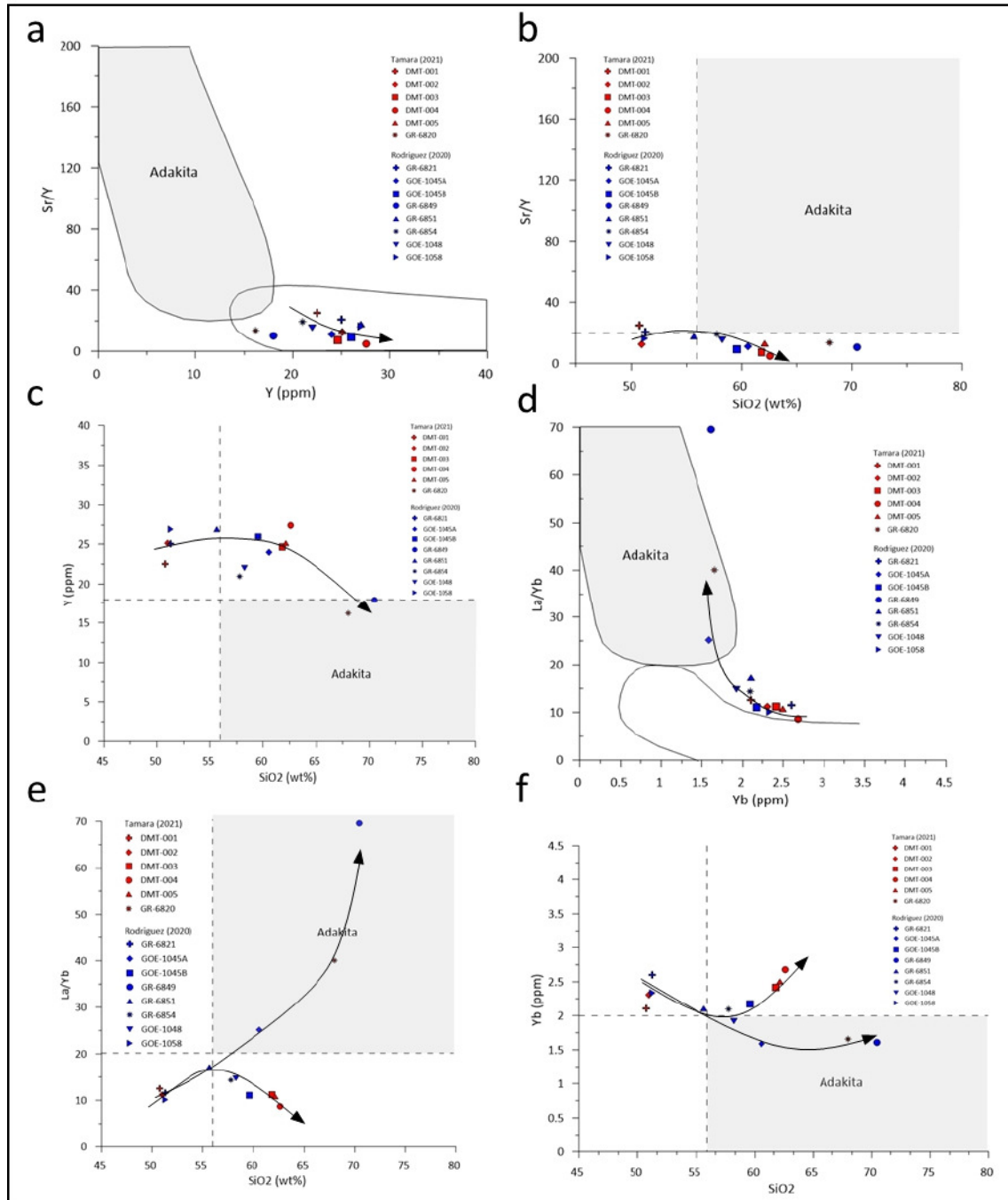


Figura 6. Diagramas de fertilidad magmática

Nota: a) Diagrama Sr/Y vs. Y. b) y c) Diagrama de variación de Sr/Y y Y respecto a SiO₂. d) Diagramas La/Yb vs. Yb. d-e) Diagramas de variación de La/Yb y Yb respecto a SiO₂. Tomada de Richards y Kerrich (2007), y modificado de Defant y Drummond (1990).

roxeno y hornblenda en vez de plagioclasa, derivando en el enriquecimiento de La (figura 6e) y empobrecimiento de Yb en composiciones ácidas (figura 6f).

Otro factor fundamental para la generación de magmas fértiles y su asociación con sistemas porfiríticos y epitermales es el contenido de agua en el fundido. A través del radio Ba/Ta en rocas intermedias (SiO_2 $61,8 \pm 5,5$ wt), es posible definir si el fundido registra altos o bajos contenidos de agua: si el radio Ba/Ta es mayor a 428, el fundido registra altos contenidos de agua y es indicador de condiciones altamente oxidantes, por lo que permite la cristalización de titanita y óxidos de hierro; en consecuencia, posteriormente cristalizan anfíboles y biotitas. Adicionalmente, Davidson *et al.* (2007) relacionan la tendencia negativa de (Dy/Yb)NC vs. SiO_2 , con la cristalización de anfíboles y biotitas en rocas de composiciones intermedias. Las rocas volcánicas de la Formación La Quinta tienen en promedio radios de Ba/Ta de 1590 en composiciones intermedias, y una tendencia negativa de (Dy/Yb)NC vs. SiO_2 ; por tanto, las rocas volcánicas de La Quinta presentan altos contenidos de agua en el fundido.

Correlación con mineralizaciones de Cu

En los flancos occidentales de la serranía del Perijá, se han identificado diversas mineralizaciones de cobre asociadas a rocas sedimentarias y volcánicas de La Quinta, donde suprayace e infrayace estratos con importantes contenidos de carbonatos, como la Formación Manaure, Grupo Cogollo y Formación Río Negro (Buchely *et al.*, 2010). Las mineralizaciones se relacionan con cuerpos intrusivos máficos y diques de composición cuarzo-epidota que únicamente cortan estratos volcánicos y sedimentarios de La Quinta (Ortega Montero *et al.*, 2012). Por consiguiente, los minerales con enriquecimiento de cobre se presentan en configuraciones diferentes dependiendo de la roca encajante, para las rocas volcánicas más básicas suelen presentarse óxidos y carbonatos de cobre, con una ausencia notable de sulfuros y los minerales que se encuentran generalmente son azurita, malaquita, cuprita y tenorita, mientras que para las rocas volcánicas intermedias a ácidas cercanas a las zonas de mineralización, no se encuentra en general mineralizaciones de cobre, posiblemente por su alta lixiviabilidad, sin embargo, es notable la presencia de hidróxidos de hierro, como goethita y limonita (Champetier de Ribes *et al.*, 1963).

Por otra parte, las rocas volcánicas que están alejadas de zonas de mineralización de Cu presentan óxidos de hierro, como magnetita y hematita. De igual manera, las mineralizaciones que se encuentran en las rocas sedimentarias de la Formación La Quinta, registran dos configuraciones distintas: (a) la primera se identifica por su constante intercalación de rocas clásticas con miembro volcánico y esporádicamente diques cuarzo-epidotíticos presentes en la misma formación, y suelen tener una configuración mineral conformada principalmente por: malaquita, azurita, cobre nativo y crisocola (Ortega Montero *et al.*, 2012); (b) la segunda se reconoce porque la mayoría de mineralizaciones de cobre, presentes en las rocas sedimentarias de La Quinta, se caracterizan por la ausencia de intercalación con complejos volcánicos y los

minerales enriquecidos en cobre son en su mayoría carbonatos, sulfuros y óxidos, que forman parte de depósitos estrato-confinados; no obstante, se sugiere que la concentración de estos minerales es producto de fluidos hidrotermales por la presencia de silificación en los paquetes sedimentarios (Manco-Jaraba *et al.*, 2019).

Las características geoquímicas que sugieren contenidos de fluidos en el magma capaces de movilizar elementos como cobre y hierro, además de la limitada área de mineralización de cobre (restringida solamente a la Formación La Quinta), permiten relacionar las concentraciones de cobre en diques y en estratos sedimentarios. El volcanismo posiblemente produjo fluidos hidrotermales que se movilizaron a través de las grietas formadas por el rápido enfriamiento de las rocas volcánicas, hospedándose en rocas porosas, como las sedimentarias de La Quinta; allí las rocas mineralizadas son afectadas por procesos supérgenos responsables de las diferentes segmentaciones minerales. De igual manera, las rocas volcánicas presentan un fuerte empobrecimiento de Cu conforme las rocas se acidifican; para Sun *et al.* (2003), se debe a la fluctuación de fugacidad de oxígeno inducida por la cristalización de óxidos de Fe-Ti y la subsiguiente reducción de sulfato que atrapa el cobre en los fluidos magmáticos. Este proceso puede explicar la oxidación y la presencia de carbonatos de cobre y hierro en las rocas basálticas que han sido moderadamente alteradas y la casi nula presencia de cobre en rocas ácidas.

Las características geoquímicas de las rocas volcánicas de La Quinta anteriormente mencionadas pueden estar relacionadas a depósitos epitermales y pequeños pórfido-cupríferos (Sun *et al.*, 2003), derivados del magma mantélico con asimilación de material sedimentario de la corteza subducida, condiciones oxidantes y una considerable cristalización fraccionada dominada principalmente por plagioclasa (Chiaradia *et al.*, 2004). Además, la cristalización de minerales en rocas volcánicas a bajas condiciones de temperatura facilita la concentración y el transporte de cobre en fluidos residuales derivados de la cristalización magmática con altos contenidos de H₂O, posiblemente por el enriquecimiento en radio Cl/H₂O (Schroeder-Cline y Bodnar, 1991).

Conclusiones

Las rocas volcánicas de la Formación La Quinta contienen tendencias negativas de hierro y titanio al incrementar el SiO₂, como consecuencia de la cristalización temprana de ilmenita y magnetita en magmas con alto contenido de H₂O; por su parte, el sodio y el potasio presentan una tendencia positiva al incrementar el SiO₂, comportamiento de alcalinotérreos y álcalis que permite identificar que el conjunto de rocas presenta una cristalización fraccionada. Con respecto a los elementos traza, los ejemplares registran un enriquecimiento de elementos de las tierras raras livianas, y un empobrecimiento continuo en elementos de las tierras raras pesadas, lo que son características de magmas derivados de zonas de subducción. Por otra parte, los análisis multielementales de óxidos mayores y de elementos traza indican composiciones habituales de potasio y sodio, así como tendencias ascendentes del radio Zr/Ti a medida que

la roca se acidifica, producto de la cristalización de minerales máficos ricos en titanio. Además de lo anterior, los ejemplares se caracterizan por su alto contenido de aluminio en comparación con el sodio y el potasio, lo que sugiere generación de minerales hidratados; igualmente, se caracterizan por pertenecer a la serie calcoalcalina, indicio, primero, de altos contenidos de álcalis y cristalización temprana de óxidos de hierro y titanio, y segundo, de configuraciones tectónicas de arcos volcánicos, caracterizados por las anomalías negativas de niobio, itrio, titanio y altos contenidos de alúmina, rubidio, lantano, torio y estroncio, sugieren procesos de fusión parcial de magmas relativamente profundos en márgenes convergentes e interacción con fluidos provenientes del manto.

El magma que originó las rocas volcánicas de la Formación La Quinta se caracteriza geoquímicamente por un enriquecimiento en elementos LILE (Ba, Th, Sr, K) y LILE/HFSE (Ba/Nb, K/Ti), además de un enriquecimiento notable de Pb debido a la asimilación de sedimentos en el magma ubicado en la cuña mantélica y empobrecimiento de Nd, como consecuencia de la preferencia del elemento para cristalizar en ortopiroxenos a altas profundidades. Estas características son producto de la hibridización de peridotitas mezcladas con material sedimentario proveniente de la corteza oceánica subducida en la cuña mantélica.

A pesar de que las rocas volcánicas de la Formación La Quinta no cumplen con todos los criterios geoquímicos para ser consideradas adakitas, geoquímicamente, reflejan grandes procesos de diferenciación magmática y procesos de interacción cortical, que son algunos procesos indispensables para la formación de fluidos hidrotermales metalíferos en etapas avanzadas de la evolución magmática y que es posible asociarlos con las mineralizaciones de cobre presentes en la unidad litológica.

Financiamiento

La investigación asociada se titula “Análisis de las rocas volcánicas de la Formación La Quinta y su relación con contextos geotectónicos favorables para la génesis de depósitos minerales en la Serranía del Perijá”, de la cual se deriva este artículo. La Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos de la Energía (ACGGP) avaló y financió la investigación.

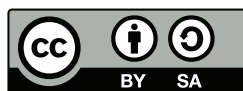
Referencias

Bayona, G., Bustamante, C., Nova, G. y Salazar, A. M. (2020). Jurassic evolution of the northwestern corner of Gondwana: Present knowledge and future challenges in studying Colombian Jurassic rocks. En J. Gómez y A. O. Pinilla Pachón (eds.), *The geology of Colombia* (vol. 2. Mesozoic) (pp. 171-207). Servicio Geológico Colombiano.

- Buchely, F., Gómez, L. A., Lancheros, J., Gómez, C. D., López, C., Romero, Ó. E., González, F., Fuquen Molano, J. A. y Navas, O. (2010). *Cartografía geológica y muestreo geoquímico de la parte norte de la serranía del Perijá*. Planchas 21, 22, 27, 28, 34 y 35. Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas).
- Champetier de Ribes, G., Pagnacco, P. F., Radelli, L. y Weecksteen, G. (1963). Geología y mineralizaciones cupríferas de la Serranía de Perijá, entre Becerril y Villanueva (departamento del Magdalena, Intendencia de La Guajira). *Boletín Geológico*, 11(1-3 SE-artículos), 133-188. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol11.1-3.1963.188>
- Chiaradia, M., Fontboté, L. y Beate, B. (2004). Cenozoic continental arc magmatism and associated mineralization in Ecuador. *Mineralium Deposita*, 39(2), 204-222. <https://doi.org/10.1007/s00126-003-0397-5>
- Condie, K. C. y Kröner, A. (2013). The building blocks of continental crust: Evidence for a major change in the tectonic setting of continental growth at the end of the Archean. *Gondwana Research*, 23(2), 394-402. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.09.011>
- Davidson, J., Turner, S., Handley, H., Macpherson, C. y Dosseto, A. (2007). Amphibole “sponge” in arc crust? *Geology*, 35(9), 787-790. <https://doi.org/10.1130/G23637A.1>
- Defant, M. J. y Drummond, M. S. (1990). Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294), 662-665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>
- Ewart, A. (1982). The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks: With special reference to the andesitic-basaltic compositional range. En R. S. Thorpe (ed.), *Andesites: Orogenic andesites and related rocks* (pp. 25-95). Wiley.
- Gallagher, J. y Tauvers, P. (1992). Tectonic evolution of northwestern South America. En R. Mason (ed.), *Basement Tectonics* 7 (pp. 123-137). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0833-3_10
- González Iregui, H., Salinas Echeverri, R., Cárdenas, J. I., Muñoz, C. y Vélez Giraldo, W. (2015). *Elaboración de la cartografía geológica de un conjunto de planchas a escala 1:100 000 ubicadas en cuatro bloques del territorio nacional, identificados por el Servicio Geológico Colombiano*. Servicio Geológico Colombiano. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B16/23008010028475/Documento/Pdf/2105284751101000.pdf>
- Hastie, A. R., Kerr, A. C., Pearce, J. A. y Mitchell, S. F. (2007). Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: Development of the Th-Co discrimination diagram. *Journal of Petrology*, 48(12), 2341-2357. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm062>




- Irvine, T. N. y Baragar, W. R. A. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5), 523-548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
- Jackson, C. y Knaebel, J. (1934). *Sampling and estimation of ore deposits*. United States Department of Commerce. <https://dggs.alaska.gov/webpubs/usbm/b/text/b356.pdf>
- Manco Jaraba, D., Ariño Díaz, K. y Rojas Martínez, E. (2019). Prospección y caracterización del yacimiento de cobre, en la vereda Los Cueros, Villanueva, departamento de La Guajira-Colombia. *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, 27(2), 288-294. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052019000200288>
- McDonough, W. F. y Sun, S.-S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3-4), 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Ortega Montero, C., Rojas Martínez, E. y Manco Jaraba, D. (2012). Mineralización de cobre en el sector de San Diego, serranía del Perijá. *Geología Colombiana*, 37, 51-62. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/22409>
- Pearce, J. (1982). Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. En R. S. Thorpe (ed.), *Orogenic andesites and related rocks* (pp. 528-548). John Wiley and Sons.
- Pearce, J. A. y Cann, J. R. (1973). Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2), 290-300. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(73\)90129-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(73)90129-5)
- Pearce, J. A. y Peate, D. W. (1995). Tectonic implications of the composition of volcanic ARC magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23(1), 251-285. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.23.050195.001343>
- Richards, J. y Kerrich, R. (2007). Special paper. Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology*, 102(4), 537-576. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.4.537>
- Rivera, A. (1994). Types of copper mineralization in Venezuela. En *Memorias VII Congreso Geológico Chileno* (pp. 1614-1615) Universidad de Concepción.
- Rodríguez García, G. y Obando, G. (2020). Volcanism of the La Quinta Formation in the Perijá mountain range. *Boletín Geológico*, 46, 51-94. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.46.2020.535>
- Sampieri Hernández, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. (6.ª ed.). McGraw-Hill.

- Schroeder-Cline, J. y Bodnar, R. (1991). Can economic porphyry copper mineralization be generated by a typical calc-alkaline melt? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B5), 8113-8126. <https://doi.org/10.1029/91JB00053>
- Shand, S. J. (1927). On the relations between silica, alumina, and the bases in eruptive rocks, considered as a means of classification. *Geological Magazine*, 64(10), 446-449.
- Spikings, R., Cochrane, R., Villagomez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W. y Beate, B. (2015). The geological history of northwestern South America: From Pangaea to the early collision of the Caribbean large igneous province (290-75Ma). *Gondwana Research*, 27(1), 95-139. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.06.004>
- Sun, S.-S. y McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society, Special Publications*, 42(1), 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Sun, W., Arculus, R. J., Bennett, V. C., Eggins, S. M. y Binns, R. A. (2003). Evidence for rhenium enrichment in the mantle wedge from submarine arc-like volcanic glasses (Papua New Guinea). *Geology*, 31(10), 845-848. <https://doi.org/10.1130/G19832.1>



Resultados de aprendizaje en ingeniería para niños con altas capacidades intelectuales

Engineering learning outcomes for children with high intellectual abilities

Cristian Lozano Tafur ¹, Nelson Eduardo Lozano Espinosa ² y Didier Aldana Rodríguez ³

Fecha de Recepción: 8 de septiembre de 2022

Fecha de Aceptación: 4 de octubre de 2024

Cómo citar: C., Lozano Tafur, N., Lozano Espinosa, D., Aldana Rodríguez. Resultados de aprendizaje en ingeniería para niños con altas capacidades intelectuales. *Tecnura*, 28(79), 140-150. <https://doi.org/10.14483/22487638.19914>

Resumen

Objetivo: Desarrollar la adaptación curricular de los resultados de aprendizaje pertenecientes a espacios académicos de ingeniería, para un niño que muestra altas capacidades intelectuales.


Metodología: El estudio de caso corresponde a una investigación de categoría mixta donde se desarrolla la adaptación curricular en el entorno de ingeniería a un niño con índices de altas capacidades intelectuales. Se desarrolla por medio de diferentes etapas: diagnóstico, adaptación curricular y evaluación, teniendo como marco de referencia las inteligencias múltiples a través de una ruta de aprendizaje basada en proyectos.

Resultados: Los resultados obtenidos muestran en el diagnóstico que el sujeto de estudio presenta un alto grado de interés en ingeniería aplicada, así como conocimientos y un grado de interés en fundamentación. La ruta de aprendizaje permitió al estudiante a través de la evaluación presentar un cumplimiento cercano al 95% de los objetivos de aprendizaje, por medio de aprendizaje basado en proyectos.

Conclusiones: La adaptación curricular pertenece a una estrategia del enriquecimiento curricular, la cual permite a las instituciones educativas adaptar sus objetivos en torno a las necesidades de los alumnos, especialmente de aquellos con altas capacidades intelectuales. Adicionalmente, dicha adaptación se aplica de manera transversal a la ingeniería con el propósito de fortalecer las rutas de aprendizaje y las evaluadoras.

Financiamiento: La investigación fue desarrollada y financiada por la Fundación Universitaria Los Libertadores.

Palabras clave: altas capacidades intelectuales, adaptación curricular, inteligencias múltiples.

¹Magíster en Ingeniería de Materiales, ingeniero aeronáutico. Docente Fundación Universitaria Los Libertadores. Bogotá, Colombia. . Email: clozanot@libertadores.edu.co

²Magíster en Ingeniería Electrónica, ingeniero electrónico. Docente Fundación Universitaria Los Libertadores. Bogotá, Colombia. . Email: nelozano@libertadores.edu.co

³Magíster en Ingeniería de Mecánica, ingeniero aeronáutico. Docente Fundación Universitaria Los Libertadores. Bogotá, Colombia. . Email: daldanar@libertadores.edu.co

Abstract

Objective: Develop curricular adaptation of learning outcomes pertaining to engineering academic spaces for a child with high intellectual abilities.

Methodology: The case study corresponds to a mixed category research where the curricular adaptation is developed in the engineering environment to a child with high intellectual abilities indexes, the research is developed through different stages such as: diagnosis, curricular adaptation and evaluation, having as a frame of reference the multiple intelligences through a learning path based on projects.

Results: The results obtained show in the diagnosis that the subject of study presents a high degree of interest in applied engineering as well as knowledge and a low degree of interest and knowledge in fundamentals. The development of the learning path allowed the student, through the evaluation path, to present a compliance close to 95% of the learning objectives, by means of project-based learning.

Conclusions: The curricular adaptation belongs to a strategy of curricular enrichment, which allows educational institutions to adapt their objectives to the needs of students, especially students with high intellectual abilities. In addition, curricular adaptation is applied transversally to engineering, strengthening the learning and evaluation routes.

Keywords: high intellectual abilities, curricular adaptation, multiple intelligences.

Introducción

El número de estudiantes que requieren una educación inclusiva ha incrementado en los últimos treinta años y la investigación ha apoyado sistemáticamente la práctica de la educación inclusiva (McGregor y Vogelsberg, 1998). Los estudiantes que presentan altas capacidades intelectuales necesitan apoyo educativo específico; por tanto, se debe implementar una propuesta educativa diferente, la cual debe contener actividades formativas orientadas a los distintos campos de conocimiento, recursos, ritmos de aprendizaje, motivaciones, intereses y habilidades.

El Ministerio de Educación Nacional (MEN) desarrolló un documento con directrices generales para la institución educativa y la familia en la atención pedagógica a alumnos con habilidades y talentos extraordinarios, y estableció los parámetros para la educación de la población con requerimientos educativos específicos en la Resolución n.º 2565 de 2003. Pero todas estas estrategias están basadas en mediciones, lo cual compromete al alumno a realizar dichas evaluaciones psicométricas y poder ser categorizado (MEN, 2003).

La Fundación Universitaria Los Libertadores, dentro de su propósito superior, abarca atención a la diversidad e inclusión, y permite la adaptación curricular de espacios académicos del entorno de ingeniería (Fundación Universitaria Los Libertadores [Ulibertadores], 2022). Como describen Janney y Snell (2013), las adaptaciones pueden ser curriculares, instructivas o alternativas. Las primeras alteran el contenido de lo que se enseña mediante adaptaciones suplementarias, simplificadas y alternativas; las pedagógicas modifican la forma en que se enseña el

contenido o se demuestra el aprendizaje e incluyen adaptaciones de los estímulos pedagógicos y de las respuestas de los alumnos; las alternativas (del estímulo instructivo y de la respuesta del alumno) cambian la "dificultad, la cantidad, la modalidad, el formato y/o los materiales utilizados para enseñar o responder a la instrucción (Janney y Snell, 2013, pp. 50-120). Por último, las adaptaciones alternativas modifican el objetivo, la instrucción y la actividad, e incluyen actividades alternativas/paralelas (por ejemplo, un alumno trabaja en el comportamiento adecuado y las habilidades sociales durante las actividades de trabajo en grupo, en lugar de la tarea académica).

Además de las adaptaciones curriculares, es fundamental considerar las capacidades intelectuales de los estudiantes. La inteligencia intelectual, por ejemplo, se basa en la capacidad cognitiva que tiene una persona al momento de aprender y tener una relación con el entorno que lo rodea, también se describe como la habilidad que poseen las personas para razonar, planificar, solucionar problemas, pensar en términos abstractos, entender ideas complicadas, aprender rápidamente un tema específico, o leer y comprender un texto. De igual manera, es la habilidad de aprender desde la experiencia; así se logra un aprendizaje significativo y se analiza la cultura y sociedad, ya que cada persona tiene su propio estilo de aprendizaje, dependiendo de cómo esté desarrollado y conformado su desarrollo cognoscitivo (Barbosa *et al.*, 2008).

Dentro de las definiciones orientadas a modelos cognitivos se puede identificar la de Sternberg *et al.* (2010), con su teoría triárctica, y a Gardner (1995), con la teoría de las inteligencias múltiples. Sternberg expone que en el rendimiento superior cognitivo se utilizan unos procesos epistémicos que ayudan a procesar la información, para enfrentarse a alguna novedad o para solucionar problemas de la vida cotidiana. Este autor va más allá del coeficiente intelectual (CI) y distingue que las inteligencias deben ser analíticas, creativas y también prácticas para contribuir de manera exitosa a la vida de los seres humanos y ayudarles a prosperar en sus carreras profesionales y vidas personales (Sternberg *et al.*, 2010). Además, las habilidades intelectuales han evolucionado en los últimos dos siglos; se ha pasado de una inteligencia psicométrica a una dinámica, la cual se va desarrollando, evolucionando y cambiando a lo largo de la vida. Gardner (1995) expone y desarrolla la teoría de las inteligencias múltiples y brinda un cambio a la concepción de la inteligencia como un elemento único y estático.

En este sentido, Gardner presenta un enfoque de inteligencias múltiples que introduce un tratamiento emergente y provocador que cuestiona el fenómeno de la inteligencia que trasciende el ámbito cognitivo. El autor argumenta que, en la resolución de problemas, lo crucial para abordar dicha problemática es la actividad, la cual debe tener un objetivo para seguir el propósito que establece estrategias para lograr los mecanismos de dicho objetivo (Macías, 2002).

Por tanto, en el marco de las inteligencias múltiples propuestas por Gardner (1995), y considerando que el estudiante ya ha desarrollado estas inteligencias cognitivas, se tomaron en cuenta para este estudio de caso tres inteligencias específicas:

- *Lógico-matemática*. Consiste en la habilidad para manejar secuencias de razonamiento que posibilitan identificar los patrones del pensamiento lógico- matemático y científico; también se trabaja la operación de símbolos, formulación y verificación de hipótesis y el pensamiento abstracto.
- *Espacial*. Es la capacidad de manejar espacios, planos, mapas, y la aptitud para visualizar objetos desde una perspectiva distinta. Finalmente, es la habilidad de construir un modelo mental del espacio.
- *Lingüística*. Es la competencia para construir oraciones, la utilización de las palabras de acuerdo con sus significados, al igual que la utilización del lenguaje a partir de su uso.

Dentro de las acciones académicas adoptadas como respuesta educativa a los estudiantes con altas capacidades intelectuales destacan las desarrolladas por [Touron et al. \(1996\)](#): aceleración, agrupamiento en clases especiales y enriquecimiento curricular. El enriquecimiento curricular facilita una adaptación curricular personalizada en la que se implementan cambios progresivos en la planificación de la clase; así, el estudiante aprende a un ritmo y nivel que se adecue a sus competencias. La adaptación curricular se implementa en los contenidos del currículo, la secuencia de aprendizaje y el proceso de evaluación ([Alonso y Mate, 1996](#); [Rubio Jurado, 2009](#)). Además, se apoya en diversas herramientas, como el enfoque de aula invertida y el aprendizaje colaborativo, para fomentar la innovación en el desarrollo de la clase ([Llanos Mosquera et al., 2021](#)).

Como indica [Hollingworth \(1942, citada por Wigtil y White, 2017\)](#), el currículo y la ruta de aprendizaje deben incluir una exploración profunda del trabajo basado en proyectos. Un gran defensor del enriquecimiento es Renzulli, quien propuso un modelo de tríada que incluía oportunidades en variedad de contenidos, problemas, conceptos, trabajos y personas ([Renzulli, 2012](#)). Así el enriquecimiento es una estrategia ideal, ya que les brinda a los estudiantes la oportunidad de profundizar la comprensión y crecer en el aprendizaje ([Olszewski-Kubilius et al., 2021](#)). Además, el enriquecimiento curricular puede basarse en la investigación, un aspecto fundamental en el siglo XXI. Esto le brinda al estudiante la oportunidad de desarrollar competencias que le permitan ser productivo y aprovechar las mejores oportunidades disponibles ([Castro et al., 2023](#)).

La adaptación curricular se lleva a cabo en función de los resultados de aprendizaje en cada uno de los espacios académicos. Así, se definen las actividades formativas, los métodos de enseñanza, las estrategias y criterios de evaluación que tengan en cuenta aspectos intelectuales y creativos ajustados al perfil del alumno. El propósito de esta investigación es implementar la adaptación curricular de los espacios académicos Dibujo Mecánico e Introducción a la Automatización y Robótica, para un niño de 9 años que presenta indicios de altas capacidades intelectuales. La adaptación curricular se realiza a partir del fortalecimiento integral de las in-

teligencias múltiples de [Gardner \(1995\)](#).

Metodología

La investigación es un caso de estudio en un niño de 9 años que presenta altas capacidades intelectuales orientadas a la ingeniería. Se desarrolló en tres fases (figura 1): la primera se refiere a una prueba de diagnóstico cuyo propósito es determinar el nivel de comprensión temática en el espacio académico; la segunda se basa en la adaptación curricular de los objetivos de aprendizaje, conocido como la ruta de aprendizaje; la tercera fase consiste en evaluar el logro de los objetivos de aprendizaje, conocido como *ruta de evaluación* ([Counsell y Fiedler, 2017](#)).



Figura 1. Metodología de enriquecimiento curricular

La prueba diagnóstica se efectuó a través de una entrevista entre el docente y el estudiante, y a través de problemas expuestos en aula, con el objetivo de explorar los conocimientos preexistentes y las preferencias personales del estudiante.

A partir de los resultados de la prueba diagnóstica, se realizó la adaptación curricular de los espacios académicos Dibujo Mecánico e Introducción a la Automatización, bajo una planificación de aula diseñada por bloques correlacionado con los resultados de aprendizaje:

- Bloque 1: fundamentación. Pertenece a los resultados de aprendizaje de 1.^{er} y 2.^o nivel en la taxonomía de Bloom.
- Bloque 2: aplicación. Basado en resultados de aprendizaje de 3.^{er} y 4.^o nivel.
- Bloque 3: creación. Aplicado a resultados de aprendizaje de 5.^o y 6.^o nivel.

De acuerdo con Rubio (2009), se adoptó una práctica de aula basada en enriquecimiento curricular, combinada con la *teoría de inteligencias múltiples*, planteada por [Gardner \(1995\)](#); por medio de las *actividades que se pueden programar*, mencionadas por [Torrego \(2011\)](#) y [Rubio Jurado \(2009\)](#). Las inteligencias múltiples trabajadas y las actividades desarrolladas se muestran en la tabla 1.

La evaluación de los objetivos de aprendizaje se llevó a cabo mediante la estrategia del aprendizaje basado en proyectos y el aprendizaje basado en problemas, y por medio del desa-

Tabla 1. Actividades para el desarrollo de las inteligencias múltiples

Inteligencia	Actividades
Espacial	<ul style="list-style-type: none">• Actividades que involucren representaciones visuales apoyadas con dibujos o ilustraciones.• Proyectos de construcción.• Tareas que requieran el uso de mapas, gráficos u otros recursos visuales.
Lógica-matemática	<ul style="list-style-type: none">• Creación de instrucciones paso a paso para actividades simples con un orden lógico establecido.• Aplicación de conceptos matemáticos para resolver desafíos o problemas de la vida cotidiana (Trejos Buriticá, 2018).• Diseño y ejecución de un experimento para poner en práctica los conocimientos adquiridos.
Lingüística-verbal	<ul style="list-style-type: none">• Lecturas.• Debates.• Mapas mentales.• Descripción de imágenes.

rollo creativo del alumno. En este sentido, se definieron tres momentos de evaluación, cada uno relacionado con un resultado de aprendizaje específico.

Resultados

La prueba diagnóstica mostró un conocimiento básico en geometría y matemáticas, necesario para el inicio de los cursos, sin embargo, se identificó un interés en temas relacionados con electrónica, computación, programación y diseño, aspectos claves para el aprendizaje de los espacios académicos. La figura 2 ilustra el grado de interés elegido por el estudiante, relacionado con sus conocimientos en cada área. Estos resultados fueron establecidos por una observación y a elección del estudiante en una escala de 0 a 5, en la que 0 corresponde al menor nivel de interés y conocimiento, y 5, al mayor.

La prueba diagnóstica muestra los resultados de interés y conocimientos del estudiante. Aquí se evidencia que el estudiante presenta un interés por los contenidos inherentes de las asignaturas y tiene un conocimiento adecuado para el correcto desarrollo de estas.

Posteriormente, se desarrolla el enriquecimiento curricular a través de la adaptación curricular basada en los intereses del estudiante, para lo cual se utilizaron diferentes estrategias pedagógicas orientadas al aprendizaje basado en proyectos (tabla 2).

A través de las estrategias pedagógicas y los objetivos de aprendizaje, se desarrolló la ruta de aprendizaje, la cual contiene lecciones magistrales entre el docente y el estudiante. Esta se basa en un modelo de enriquecimiento tipo III, enfoque que implica que el estudiante inves-

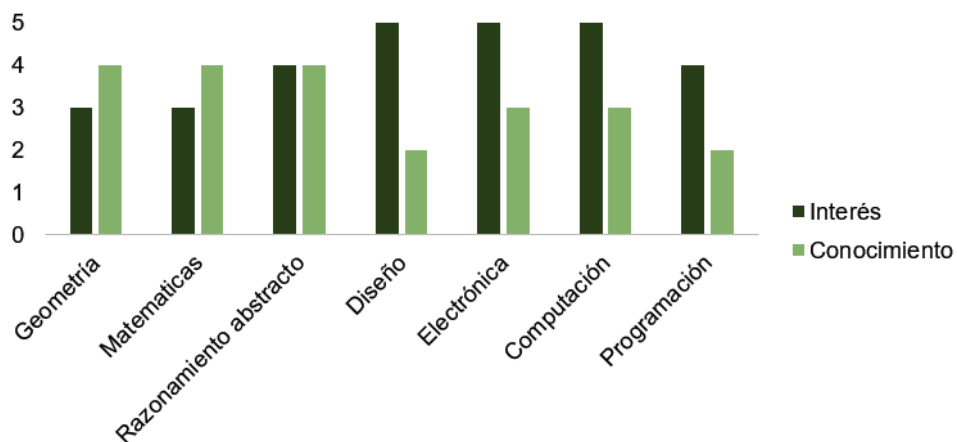


Figura 2. Resultado prueba diagnóstica, intereses y conocimientos

tigue sobre problemas reales, lo que favorece el desarrollo de la innovación y la creatividad (Renzulli, 1976). La figura 3 muestra la ruta de aprendizaje desarrollada para cada objetivo de aprendizaje basada en las estrategias pedagógicas sugeridas.

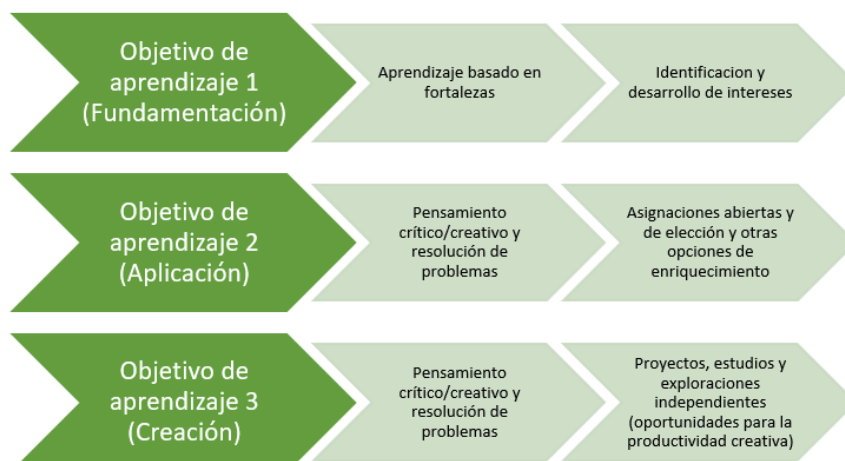


Figura 3. Ruta de aprendizaje

Por último, la evaluación se efectuó a partir del desarrollo de un proyecto que integra los dos espacios académicos; que sugiere la innovación y creación en torno a los intereses del estudiante. En este contexto, la evaluación se centró en el cumplimiento de cada resultado de aprendizaje. De manera cuantitativa, se evaluó bajo una rúbrica con un puntaje de 0 a 5, donde 0 corresponde al cumplimiento más bajo y 5 al cumplimiento total. El resultado de la evaluación se presenta en la figura 4. Se puede observar cómo el estudiante obtuvo una nota de 4 en los objetivos de aprendizaje de fundamentación y 4,2 en los de aplicación. Por otro lado, en el objetivo de creación, al ser una actividad basada en proyectos, destacó con la valoración más

Tabla 2. Estrategias de la pedagogía del enriquecimiento

Estrategia pedagógica	Descripción
Aprendizaje basado en fortalezas	Se utilizan las fortalezas académicas del estudiante, preferencias de aprendizaje, intereses y talentos, con el fin de crear sistemáticamente oportunidades de aprendizaje.
Identificación y desarrollo de intereses	Métodos útiles utilizados para identificar y desarrollar los intereses de los estudiantes en clase, como el uso de instrumentos de evaluación de intereses y centros de desarrollo de intereses en el aula.
Pensamiento crítico/creativo y resolución de problemas	Brindar oportunidades para usar el pensamiento crítico y creativo y la resolución de problemas (capacidad para interpretar la información de manera crítica y emitir un juicio, y usar el pensamiento abierto que da como resultado múltiples ideas y soluciones).
Proyectos, estudios y exploraciones independientes (oportunidades para la productividad creativa)	Permite el desarrollo de comportamientos creativos-productivos y promueve el trabajo a través de problemas y áreas de estudio que tengan relevancia personal para ellos. El trabajo en estos estudios a menudo se puede utilizar para resolver problemas y marcar una diferencia en la sociedad, ya sea individualmente o en grupos de estudiantes.
Asignaciones abiertas y de elección y otras opciones de enriquecimiento	Proporcionar asignaciones abiertas y de elección, incluidas tareas para el hogar y tareas de clase.

Nota: tomada de [Reis et al. \(2021\)](#).

alta: 4,8. Además, cada objetivo de aprendizaje se evaluó en torno a las inteligencias múltiples aplicadas.

Conclusiones

El enriquecimiento curricular forma parte de los programas de formación de estudiantes con altas capacidades intelectuales, ya que persigue objetivos como motivar el pensamiento lógico, enriquecer la creatividad, aumentar la autoestima a partir de la combinación de teoría y práctica, y la superación personal.

Se evidencia que el enriquecimiento curricular contribuye a la educación de alumnos con altas capacidades intelectuales; además, si el enriquecimiento está basado en proyectos y en los intereses del alumno, los resultados son positivos, lo que les permite a los docentes estable-

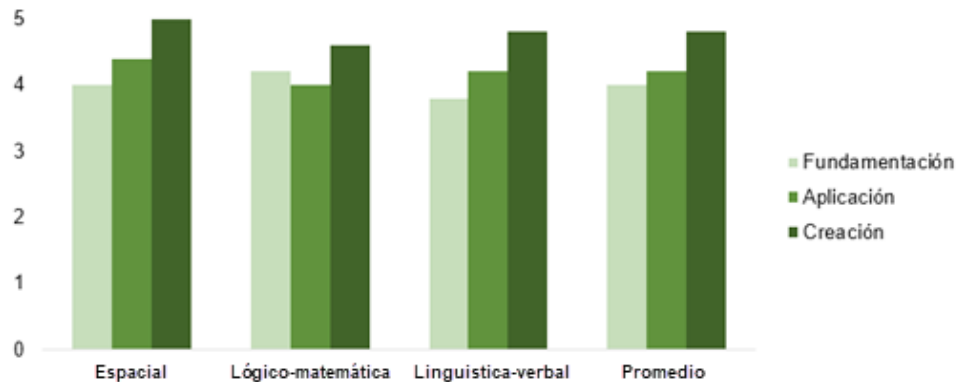


Figura 4. Resultados de la evaluación por objetivos de aprendizaje e inteligencias múltiples aplicadas

cer una ruta de aprendizaje que potencializa las capacidades del estudiante y cumple con los resultados de aprendizaje.

Por otro lado, las instituciones que centran su trabajo en la integración, inclusión y atención a la diversidad, permiten que los docentes y los espacios académicos logren adaptarse a las distintas necesidades de los estudiantes; además, ofrecen a los alumnos la oportunidad de experimentar nuevos contenidos y procesos, la exposición a nuevas ideas y amplios temas interdisciplinarios, el aprendizaje independiente y autónomo.

Referencias

- Alonso, J. A. y Mate, Y. B. (1996). *Superdotados: adaptación escolar y social en secundaria*. Narcea Ediciones.
- Barbosa, C. P., Ceballos, E. C. y Castellón, L. S. (2008). Identificación de estudiantes con altas capacidades en el Distrito de Santa Marta, Colombia. *Universitas Psychologica*, 7(1), 251-262.
- Castro, J., Gómez, L. y Camargo, E. (2023). La investigación aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI. *Tecnura*, 27(75), 140-174. <https://doi.org/10.14483/22487638.19171>
- Councill, K. H. y Fiedler, L. (2017). Gifted 101: Unlocking the mystery of academically gifted education. *Music Educators Journal*, 103(4), 48-56. <https://doi.org/10.1177/0027432117697005>
- Fundación Universitaria Los Libertadores (Ulibertadores). (2022). *Nuestra institución*. <https://www.ulibertadores.edu.co/institucion/>
- Gardner, H. (1995). *Inteligencias múltiples*. Paidós.

- Janney, R. y Snell, M. E. (2013). *Teachers' guides to inclusive practices: Modifying schoolwork*. Brookes Publishing.
- Llanos Mosquera, J. M., Hidalgo Suarez, C. G. y Bucheli Guerrero, V. A. (2021). Una revisión sistemática sobre aula invertida y aprendizaje colaborativo apoyados en inteligencia artificial para el aprendizaje de programación. *Tecnura*, 25(69), 196-214. <https://doi.org/10.14483/22487638.16934>
- Macías, M. A. (2002). Las múltiples inteligencias. *Psicología desde el Caribe*, (10), 27-38. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=21301003>
- McGregor, G. y Vogelsberg, R. (1998). *Inclusive schooling practices: Pedagogical and research foundations. A synthesis of the literature that informs best practices about inclusive schooling*. Ilegheny University of the Health Sciences. <http://eric.ed.gov/?id=ED418559>
- Ministerio de Educación Nacional (MEN). (2003). Resolución 2565 de 2003. <https://www.mineducacion.gov.co/portal/ejes-tematicos/Normas-sobre-Educacion-Preescolar-Basica-y-Media/85960:Resolucion-2565-de-October-24-de-2003>
- Olszewski-Kubilius, P., Subotnik, R. F. y Worrell, F. C. (2021). *Talent development as a framework for gifted education: Implications for best practices and applications in schools*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003238454>
- Reis, S. M., Renzulli, S. J. y Renzulli, J. S. (2021). Enrichment and gifted education pedagogy to develop talents, gifts, and creative productivity. *Education Sciences*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/educsci11100615>
- Renzulli, J. S. (1976). The enrichment triad model: A guide for developing defensible programs for the gifted and talented. *Gifted Child Quarterly*, 20(3), 303-306. <https://doi.org/10.1177/001698627602000327>
- Renzulli, J. S. (2012). Reexamining the role of gifted education and talent development for the 21st century: A four-part theoretical approach. *Gifted Child Quarterly*, 56(3), 150-159. <https://doi.org/10.1177/0016986212444901>
- Rubio Jurado, F. (2009). Los alumnos/as con altas capacidades intelectuales. *Innovación y Experiencias Educativas*, (19), 1-14. https://archivos.csif.es/archivos/andalucia/ensenanza/revistas/csif/revista/pdf/Numero_19/Francisco_Rubio_Jurado01.pdf
- Sternberg, R., Grigorenko, E., Ferrando, M., Hernández, D., Ferrándiz, C., Bermejo, R. y Prieto, M. D. (2010). Enseñanza de la inteligencia exitosa para alumnos superdotados y

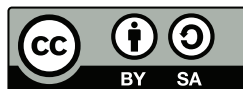
talentos. *Revista Electrónica Interuniversitaria de Formación del Profesorado*, 13(1), 111-118.
<http://www.aufop.com-consultadaenfecha>

Torrego, J. (2011). *Alumnos con altas capacidades y aprendizaje cooperativo. Un modelo de respuesta educativa*. Fundación Pryconsa y Fundación SM.

Tourón, J., Peralta, F. y Repáraz, C. (1996). La aceleración como estrategia educativa para alumnos de alta capacidad académica: concepto, modalidades y evaluación de resultados. *Revista Española de Pedagogía*, 54(203). <https://doi.org/10.22550/2174-0909.2103>

Trejos Buriticá, O. I. (2018). Aprovechamiento de los tipos de pensamiento matemático en el aprendizaje de la programación funcional. *Tecnura*, 22(56), 29-39. <https://doi.org/10.14483/22487638.12807>

Wigtil, C. y White, W. (2017). Children above 180 IQ Stanford-Binet: A seventy-five year follow-up. *Journal of Genius and Eminence*, 2(1), 77-91. <https://doi.org/10.18536/jge.2017.04.02.01.08>



CONTENIDO

- Alcance y política editorial de la revista
- Tipos de artículos aceptados
- Formato del artículo
- Envío de artículos
- Procedimiento para la publicación
- Arbitraje de artículos
- Contacto

ALCANCE Y POLÍTICA EDITORIAL DE LA REVISTA

La revista *Tecnura* es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Francisco José de Caldas, de carácter científico-tecnológico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre del año 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

Las áreas temáticas de interés de la revista *Tecnura* están enfocadas a todos los campos de la ingeniería, como la electrónica, telecomunicaciones, electricidad, sistemas, industrial, mecánica, catastral, civil, ambiental, entre otras. Sin embargo, no se restringe únicamente a estas, también tienen cabida los temas de educación y salud, siempre y cuando estén relacionados con la ingeniería. La revista publica únicamente artículos de investigación científica y tecnológica, de reflexión y de revisión. En consecuencia, durante la fase de evaluación editorial inicial se rechazarán los artículos cortos y reportes de caso.

La revista *Tecnura* está dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales interesados en la actualización permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigación científico-tecnológica, en el campo de las ingenierías. Tiene como misión divulgar resultados de proyectos de investigación realizados en el área de las ingenierías, a través de la publicación de artículos originales e inéditos, realizados por académicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden público o privado. Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés; sin embargo, tendrán preferencia los artículos que muestren conceptos innovadores de gran interés, que traten sobre asuntos relacionados con el objetivo y cobertura temática de la revista.

Tecnura es una publicación de carácter académico indexada en los Índices Regionales Scielo Colombia (Colombia) y Redalyc (México), además de las siguientes bases bibliográficas: INSPEC del

Institution of Engineering and Technology (Inglaterra), Fuente Académica Premier de EBSCO (Estados Unidos), CABI (Inglaterra), Index Copernicus (Polonia), Informe Académico de Gale Cengage Learning (México), Periódica de la Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (España) y Dialnet de la Universidad de la Rioja (España). También hace parte de los siguientes directorios: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Latindex (México), Índice Bibliográfico Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (España), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

Tecnura es una revista arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformación de sus comités Científico y Editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sus directivas, el Editor, el Comité Editorial y Científico no son responsables por la opinión y criterios expresados en el contenido de los artículos y estos se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial.

Además de la versión impresa, la revista Tecnura tiene también una versión digital disponible en su página web: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

TIPOS DE ARTÍCULOS ACEPTADOS

De acuerdo con la clasificación del Índice Nacional de Publicaciones Científicas y Tecnológicas

(Publindex-Colciencias), la revista Tecnura recibe postulaciones de artículos inéditos de los siguientes tipos:

Artículos de investigación científica y tecnológica: documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.

Artículo de revisión: documento resultado de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de las investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de al menos 50 referencias.

FORMATO DEL ARTÍCULO

Del lenguaje y estilo apropiado para la redacción de artículos

- Deben emplearse estructuras de oraciones simples, evitando las que sean demasiado largas o complejas.
- El vocabulario empleado debe ser básico y común. Los términos técnicos deben explicarse bre-

vemente; asimismo, el significado de las siglas debe presentarse la primera vez que estas aparezcan en el texto.

- Los autores son responsables de que su trabajo sea conducido de una manera profesional y ética.

De la extensión de los documentos

Los artículos no deben tener una extensión de más de 25 páginas en tamaño carta y a doble espacio, con márgenes simétricas de 3 cm. Solo en el caso de los artículos de revisión las 25 páginas no incluyen las referencias bibliográficas.

Del formato de presentación

Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés y deben digitalizarse en Microsoft Word (2003 en adelante), cumpliendo con las siguientes indicaciones:

Letra *Times New Roman* de 12 puntos (a excepción de que se requiera lo contrario para algunos apartados).

- Una columna a doble espacio.
- Todas las márgenes de 3 cm.
- Los párrafos se justifican, y no debe haber espacio entre los consecutivos.
- No incluir saltos de página o finales de sección.
- Si se desea resaltar palabras o frases del texto, no usar letra negrita sino letra cursiva.
- Los decimales se deben señalar con coma (,) y no con un punto.
- Los millares y millones se deben señalar con un espacio fino.
- Evitar las notas de pie de página.
- Se debe utilizar nomenclatura arábiga hasta el tercer nivel únicamente.

De la estructura del documento

Los trabajos deben tener la siguiente estructura y cumplir con los siguientes requisitos:

Composición de un artículo

Todos los artículos remitidos para su evaluación y posible publicación por parte de la revista *Tecnura* deben tener por lo menos los siguientes componentes:

- Título en español e inglés.
- Información de los autores.
- Resumen en español e inglés.
- Palabras clave en español e inglés.
- Introducción.
- Conclusiones.
- Trabajo futuro (opcional).
- Agradecimientos (opcional).
- Referencias bibliográficas.

Si el artículo es de investigación científica y tecnológica deben tener, además de lo anterior, los siguientes componentes:

- Metodología.
- Resultados.
- Financiamiento.

Título

El título del artículo deberá ser corto o dividido en título y subtítulo, atractivo para el lector potencial y escrito en mayúscula sostenida. Este debe aparecer centrado entre las márgenes, escrito con letra *Times New Roman*, en negrita, tamaño de fuente 18. El título del artículo debe ir en español e inglés separado por un espacio doble. Máximo 20 palabras.

Autores

Después del título debe escribirse el (los) nombre(s) completo(s) del (los) autor(es), acompañado de los datos biográficos básicos: título de pregrado, título de posgrado, ocupación o cargo, afiliación institucional (institución donde labora), dependencia, ciudad, país y correo electrónico. La información anterior debe ir inmediatamente debajo del nombre del autor.

Resumen

Debe establecer el objetivo y alcance del trabajo, una descripción clara y concisa de la metodología, los resultados y las conclusiones obtenidas. Máximo 250 palabras.

Palabras clave

Debe escogerse entre tres y diez palabras clave, escritas en español con letra *Times New Roman*, en negrita y cursiva.

Las palabras clave deben estar escritas en orden alfabético y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar el tesoro de la UNESCO que se pueden encontrar en la página: <http://databases.unesco.org/thessp>.

Abstract

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés del texto que aparece en el resumen en español.

Keywords

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés de la lista de palabras clave en español.

Las *keywords* deben estar escritas en el orden de las palabras clave y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar los Tesoros de la IEEE y/o World Bank que se pueden encontrar en las siguientes páginas respectivamente: http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf, <http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

Introducción

Debe describir el planteamiento general del trabajo, así como contexto, antecedentes, estado de arte de la temática abordada, objetivo y posible alcance del trabajo.

Metodología

La redacción de este apartado debe permitir a cualquier profesional especializado en el tema replicar la investigación.

Resultados

Explicación e interpretación de los hallazgos. Si es necesario, se puede presentar una discusión breve y enfocada a la interpretación de los resultados.

Conclusiones

Implicación de los resultados y su relación con el objetivo propuesto.

Financiamiento

Mencionar la investigación asociada de la cual se derivó el artículo y la entidad que avaló y financió

dicha investigación.

Agradecimientos

Preferiblemente deben ser breves y deben incluir los aportes esenciales para el desarrollo del trabajo.

Ecuaciones

Deben aparecer centradas con respecto al texto principal. Las ecuaciones deben ser referenciadas con números consecutivos (escritos entre paréntesis cerca al margen derecho). Las ecuaciones se citan en el texto principal empleando la palabra ecuación y seguida del número entre paréntesis. Las ecuaciones deben ser elaboradas en un editor de ecuaciones apropiado y compatible con el paquete de software InDesign, por ejemplo, el editor de ecuaciones de Windows.

Tablas

Para el caso de realización de tablas se recomienda que estas no sean insertadas como imágenes, considerando que en este formato no pueden ser modificadas. El encabezado de cada tabla debe incluir la palabra Tabla (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de un breve nombre de la tabla. El encabezado debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9.

No se presentan cuadros sino tablas y estas se deben levantar automáticamente desde el procesador de textos. Las tablas deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda tabla debe tener en su parte inferior la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

Figuras

Todas las figuras o fotografías deben enviarse en formato PNG o TIFF con una resolución mínima de 300 DPI, adaptadas a escala de grises.

El pie o rótulo de cada figura debe incluir la palabra Figura (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de una breve descripción del contenido de la figura. El pie de figura debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9. Las figuras deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda figura debe tener también la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

Símbolos

Los símbolos de las constantes, variables y funciones en letras latinas o griegas –incluidos en las ecuaciones– deben ir en cursiva; los símbolos matemáticos y los números no van en cursiva. Se deben identificar los símbolos inmediatamente después de la ecuación. Se deben utilizar las unidades,

dimensiones y símbolos del sistema internacional.

Cuando se empleen siglas o abreviaturas, se debe anotar primero la equivalencia completa, seguida de la sigla o abreviatura correspondiente entre paréntesis y en lo subsecuente se escribe solo la sigla o abreviatura respectiva.

Referencias bibliográficas

El estilo de citación de referencias adoptado por la revista *Tecnura* es APA sexta edición. Las citas, referencias bibliográficas e infografía se incluyen al final del artículo. Las referencias bibliográficas deben ordenarse alfabéticamente de acuerdo con el primer apellido del primer autor, sin numeración.

Solo deben aparecer las referencias que fueron citadas en el texto principal del trabajo, en las tablas o en las figuras. Es decir, en la lista no deben aparecer otras referencias aunque hayan sido consultadas por los autores para la preparación del trabajo. Sugerimos utilizar herramientas como: *Citas y bibliografía de Microsoft Word* (para APA sexta edición versión 2013 o superior), *Zotero*, *Mendeley*, entre otras.

El llamado de una referencia bibliográfica se inserta en el texto, en el punto pertinente, bajo ciertas características:

- Si la oración incluye el apellido del autor, solo se debe escribir la fecha dentro de un paréntesis, ejemplo:
Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en . . .
- Cuando no se incluye el autor en la oración, debe ir entre el paréntesis el apellido y la fecha. La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).
- Si el documento u obra tiene más de dos autores, se debe citar la primera vez con todos los apellidos. 1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008) . . .
- En las menciones siguientes, solo se debe escribir el primer apellido del autor, seguido de un “et al”. En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que . . .
- Cuando el documento u obra tiene más de seis autores, se debe utilizar desde la primera mención el “et al”.

A continuación se describen una serie de ejemplos de las referencias más utilizadas, según el estilo de referencias adoptado por la revista *Tecnura*:

Publicaciones Periódicas:

Forma Básica

Apellidos, A. A., Apellidos, B. B. & Apellidos, C. C. (Fecha). Título del artículo. Título de la publicación, volumen (número), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

Artículo básico

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. *Revista Tecnura*, 18(42), 12-23. doi: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01>

Artículo web

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHZ. *Revista Tecnura*, 18(42), 38-52. Recuperado de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/8059/9675>

Libros:

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). Título. Ciudad: Editorial.

Apellidos, A. A. (Año). Título. Recuperado de <http://www.xxxxxx.xxx>

Apellidos, A. A. (Año). Título. doi: xx.xxxxxxxx

Apellidos, A. A. (Ed.). (Año). Título. Ciudad: Editorial.

Libro con autor

Goleman, D. (2000). *La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual*. México: Ediciones B.

Libro con editor

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). *Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales*. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas

Libro versión electrónica:

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). *Psychology of Liberation: Theory and applications*. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/978-0-387-85784-8

Informe técnico

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). Título. (Informe Núm. xxx). Ciudad: Editorial

Informe con autores

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). *U. S. Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico. (General Technical Report IITF-40)*. San Juan: International Institute

of Tropical Forestry.

Informe de una agencia del gobierno

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

Tesis

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). Título. (Tesis inédita de maestría o doctorado). Nombre de la institución, Localización.

Tesis inédita, impresa

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

Tesis de base de datos comercial

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

Tesis web

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf

Estándares o patentes

Forma Básica

Apellidos, A. A. Título de la patente. País y número de la patente. Clasificación de la patente, fecha de concesión oficial. Número y fecha de solicitud de la patente, paginación.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

ENVÍO DE ARTÍCULOS

Los autores deben enviar sus artículos a través de la aplicación para tal fin del Open Journal System

en formato digital, adjuntando la carta de presentación y el formato de información artículo-autores.

Carta de presentación

El artículo debe ir acompañado de una carta de presentación dirigida al director y editor de la revista, Ing. Alexander Jiménez Triana, donde incluya:

- Solicitud expresa de considerar su artículo para publicarlo en la revista Tecnura.
- Título completo del trabajo.
- Nombres completos de todos los autores del trabajo.
- Certificación de la originalidad y el carácter inédito del trabajo.
- Exclusividad de su remisión a la revista Tecnura.
- Confirmación de la autoría con la firma de todos los autores.

Esta carta deberá estar firmada por todos los autores, escanearse y enviarse junto con los demás documentos solicitados.

Formato de información artículo-autores

El artículo además debe ir acompañado de un formato de información sobre el artículo y sus autores, el cual se puede descargar de la página web de la revista Tecnura: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>, en la sección "Formatos y Documentos". Es importante completar todos los campos de información solicitados, algunos de ellos tienen comentarios para aclarar mejor lo que se está solicitando. El formato no debe escanearse.

Artículo

Artículo en formato digital (Word 2003 en adelante) que cumpla con todas las normas de presentación descritas en el capítulo 3, "Formato del artículo", de la presente en las instrucciones a los autores.

PROCEDIMIENTO PARA LA PUBLICACIÓN

El procedimiento que sigue la revista Tecnura para la evaluación y posible publicación de los trabajos enviados por los autores es el siguiente en orden cronológico:

1. Envío del artículo acompañado de la carta de presentación y el formato de información por parte de los autores.
2. Notificación al autor de correspondencia de la recepción del artículo.
3. Verificación del tema del artículo con respecto a las áreas de interés de la revista.

4. Verificación de las normas de presentación por parte del monitor de la revista.
5. Notificación al autor de correspondencia de la evaluación de las normas de presentación.
6. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a la evaluación de las normas de presentación
7. Envío del artículo a los árbitros seleccionados.
8. Notificación del inicio del proceso de arbitraje del artículo.
9. Notificación a los autores de la decisión tomada por el Comité Editorial y de las evaluaciones hechas por los árbitros.
10. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a las evaluaciones de los árbitros.
11. Estudio de la versión final del artículo y de las evaluaciones de los árbitros por parte del Comité Editorial.
12. Envío por parte de los autores de la carta de cesión de derechos al editor de la revista.
13. Envío de la versión con corrección de estilo y diagramada a los autores.
14. Verificación de errores y aprobación final de la versión con corrección de estilo y diagramada por parte de los autores.
15. Publicación del artículo en el número correspondiente de la revista Tecnura.
16. Notificación a los autores de la publicación del número de interés.
17. Envío de un ejemplar de la revista a cada autor del artículo publicado.

PROCESO DE ARBITRAJE DE ARTÍCULOS

Considerando la periodicidad trimestral de la revista, el Comité Editorial realiza cuatro convocatorias anuales para la recepción de artículos, aproximadamente en los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre. Los artículos serán recibidos hasta la fecha máxima establecida en cada convocatoria.

Una vez recibidos los artículos el monitor de la revista realizará una primera evaluación de forma para verificar que cumplan con todos los elementos mencionados en esta guía de instrucciones a los autores. Luego de recibir nuevamente el artículo con las correcciones de forma solicitadas por el monitor de la revista, este será sometido a evaluación por tres pares académicos (paulatinamente se espera incorporar un mayor número de pares externos que participen en el proceso).

Cada artículo remitido a la revista *Tecnura* es revisado por dos pares académicos externos a la institución de los autores, mediante un proceso de “revisión entre pares” (*Peer-review*) de doble-ciego, garantizando el anonimato de los autores y evaluadores; se considera confidencial todo trabajo recibido y así se le exige a sus evaluadores.

Las posibles conclusiones de los resultados de la evaluación por parte de los árbitros son únicamente tres: publicar el artículo sin modificaciones, publicar el artículo con modificaciones o no publicar el artículo.

Posteriormente, el Comité Editorial toma la decisión de publicar o no los artículos, con base en los resultados de las evaluaciones realizadas por los árbitros asignados. En caso de existir contradicciones en las evaluaciones con respecto a la publicación de un artículo, el Comité Editorial enviará el artículo a un tercer árbitro y se inclinará por las dos evaluaciones que tengan el mismo concepto respecto a la publicación del artículo.

En cada convocatoria el autor de correspondencia debe sugerir al menos cuatro posibles evaluadores externos a su institución laboral, los cuales deben ser especialistas en el tema específico del artículo remitido, tener al menos maestría y por lo menos dos deben ser internacionales. Los posibles evaluadores pueden pertenecer a una universidad o industria, pública o privada; de estos se debe proporcionar el nombre completo, su formación académica más alta, su afiliación institucional y su correo electrónico. Estos cuatro potenciales evaluadores serán analizados por el Comité Editorial a fin de ampliar la base de datos de los árbitros de la revista *Tecnura*.

El Comité Editorial de la revista *Tecnura* se reserva los derechos de impresión, reproducción total o parcial del artículo, así como el de aceptarlo o rechazarlo. Igualmente, se reserva el derecho de hacer cualquier modificación editorial que estime conveniente; en tal caso el autor recibirá por escrito recomendaciones de los evaluadores. Si las acepta, deberá entregar el artículo con los ajustes sugeridos dentro de las fechas fijadas por la revista para garantizar su publicación dentro del número programado.

CONTACTO

Para cualquier solicitud de información adicional puede comunicarse a través del correo electrónico de la revista *Tecnura*: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com, o por mensajería con el Ing. Alexander Jiménez Triana, Director y Editor de la revista *Tecnura*, a la dirección:

Revista *Tecnura*
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.
Facultad Tecnológica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur
Teléfono: 571 – 3239300 Extensión: 5003



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Instrucciones para los autores

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/about/submissions>

Bogotá D.C., Colombia

Email:

tecnura.ud@udistrital.edu.co

Página web:

<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

CONTENT

- Scope and editorial policy of the journal
- Type of accepted articles
- Article format
- Article submission
- Publication procedure
- Article arbitration
- Contact

Tecnura journal is an institutional publication of the Faculty of Technology from University Francisco José de Caldas. It is a scientific and technological publication with quarterly periodicity, which is published in January, April, July and October. The first issue appeared in the second semester of 1997 and up to now it has maintained its regularity.

The areas of interest of Tecnura journal are focused on all engineering fields such as electronics, telecommunications, electricity, systems, industrial, mechanics, cadastral, civil, environmental, among others. However, it is not restricted to those; it also has room for education and health issues, as long as they are related to engineering. The journal will only publish concerning scientific and technological research, reflection and revision. In consequence, during the initial editorial evaluation, short articles and case reports will be rejected.

Tecnura Journal is addressed for professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and follow-up of scientific-technologic processes in the field of engineering. Tecnura Journal has as mission to disseminate results of research projects in the areas of engineering, through the publication of original and unpublished articles, conducted by academics and professionals accredited by public or private national or foreign institutions. Articles submitted to Tecnura journal must be unpublished works written in Spanish or English; nevertheless, preference will be given to articles that show innovative concepts of great interest, related to the objective and scope of the journal.

Tecnura is an academic publication indexed in the Regional Index Scielo Colombia (Colombia) and Redalyc (México); as well as of the following bibliographic databases: INSPEC of the Institution of Engineering and Technology (England), Fuente Académica Premier of EBSCO (United States), CABI (England), Index Copernicus (Poland), Informe Académico of Gale Cengage Learning (México), Periódica from the Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (Spain) and Dialnet from the Universidad de la Rioja (Spain). It is also part of the following directories: Online

Regional Information System for Scientific journals from Latin America, Caribbean, Spain and Portugal Latindex (México), Bibliographic Index Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (Spain), DOAJ (Sweden) and Ulrich of Proquest (United States).

Tecnura is a journal arbitrated by a revision process among double blind peers. The schedule of the conformation of its scientific and editorial committee is subject to the publication of articles in internationally indexed journals by their members.

District University Francisco José de Caldas, its directors, the editor, the editorial and scientific committee are not responsible for the opinions and the criteria expressed in the content of the articles and they are published under the exclusive responsibility of the authors and do not necessarily reflect the ideas of the editorial committee.

In addition to the printed version, Tecnura journal also has a digital version available in its web page: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>

TYPE OF ARTICLES ACCEPTED

According to the classification of the Scientific and Technological Publications National Index (Publindex-Colciencias), Tecnura journal receives nominations of unpublished articles on the following topics:

- **Scientific and technological research articles:** document that presents, in a detailed manner, the original results of research projects. The generally used structure contains four main parts: introduction, methodology, results and conclusions.
- **Reflection articles:** document that presents research results from an analytic, interpretative or critic perspective from the author, dealing with a specific topic and adopting original sources.
- **Review article:** document that results from a research where the results of published or unpublished research on a science or technology field are analyzed, systematized and integrated, in order to state the advances and tendencies in development. It is characterized for presenting a careful bibliographical review of at least 50 references.

ARTICLE FORMAT

About the appropriate language and style for articles writing

- Authors must use simple sentence structures, avoiding those too long or complex.
- The vocabulary used must be basic and common. Technical language must be briefly explained; also, the meaning of the acronyms must be given the first time they appear in the text.
- The authors are responsible for their work to be conducted in a professional and ethic manner.

About the length of articles

The articles should not exceed 25 pages in letter size and double space, with symmetric margins of 3 cm. Only in the case of review articles, these 25 pages do not include references.

About the presentation format

Submitted articles must be unpublished works written in Spanish or English, and must be typed in Microsoft Word (2003 and beyond), complying with the following indications:

- *Times New Roman* letter, 12 point (except it is required for some sections).
- One column, double-spaced.
- All the margins 3 cm.
- Paragraphs should be justified without spaces between consecutives and without cutting words.
- Do not include page breaks or section finals.
- If you want to emphasize words or phrases from the text, do not use bold letters but italic.
- Decimals should be pointed with comma (,) and not with period (.).
- Thousands and millions should be pointed with a fine space.
- Avoid footnotes.
- Arabic nomenclature must be used only until the third level.

About the article structure

The papers must have the following structure and comply with the following requirements:

Composition of an article

All the articles submitted for evaluation and possible publication by the Tecnura Journal must have at least the following components:

- Title in Spanish and English.
- Information about the authors.
- Abstract in Spanish and English.
- Key words in Spanish and English.
- Introduction.
- Conclusions.

- Future work (optional).
- Acknowledgements (optional).
- Bibliographical references.

If the article is related to scientific and technological research must have, in addition to the above, the following components:

- Methodology.
- Results.
- Financing.

Title

The title of the article must be short or divided in title and subtitle, attractive for the potential reader and written in capital letters. It should appear centered between the margins, written in *Times New Roman* letter, in bold, font size 18. The title of the article has to be in Spanish and English separated by double space. Maximum 20 words.

Authors

After the title the complete name(s) of the author(s) must be written, with their basic biographical data: undergraduate degree, graduate degree, occupation or position, institutional affiliation (institution where they work), dependency, city, country and e-mail. The above information must be immediately below the author's name.

Abstract

The scope and purpose of the work must be established giving a clear and concise description of the methodology, results presented and the conclusions obtained. Maximum of 250 words.

Keywords

Between three and ten keywords must be chosen, written in English with *Times New Roman* letter in bold and italic.

Key words must be written in alphabetic order and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the IEEE thesaurus and World Bank thesaurus that can be accessed at the following web pages respectively:

http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf

<http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

Abstract in Spanish

Translation to the Spanish language of the text that appears in the abstract, it must be correct and precise.

Keywords in Spanish

Translation to the English language of the keywords in Spanish, they must be correct and precise.

Keywords must be written in the order of the English version and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the UNESCO thesaurus that can be found at the following web pages:

<http://databases.unesco.org/thessp>

Introduction

The general idea of the work must be described, its context, backgrounds, state of the art of the topic, objectives and possible scope of the work.

Methodology

The writing of this part must allow any specialized professional in the topic to replicate the research.

Results

Explanation and interpretation of the findings. If necessary, a brief discussion focused on the interpretation of the results can be presented.

Conclusions

Implication of the results and their relation to the proposed objective.

Financing

Mention the associated research from which the article was derived and the entity that endorsed and financed the research.

Acknowledgments

They should preferably be brief and include the essential contributions for the development of the paper.

Equations

Equations must appear centered with respect to the main text. They must be referenced with consecutive numbers (written in parenthesis close to the right margin). Equations are cited in the main text employing the word equation, and followed by the number in parenthesis. Equations must be made in an appropriate equation editor and compatible with "InDesign" software, as for example the equation editor of Windows.

Tables

In the case of implementation of tables, it is recommended that these are not inserted as images, considering that in that format they cannot be modified. The title of each table must include the word table (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief name of the table. The heading must be written in TNR letter, italic and font size 9.

Charts are not presented but tables and they should be automatically raised from the text processor. Tables should be named and referenced in the article, in strict order. Every table must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

Figures

All the figures or pictures have to be sent in JPG or PNG format with a minimum resolution of 300 DPI, adapted to gray scale.

The footnote or name of each figure must include the word figure (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief description of the content of the figure. The footnote of the figure must be written in Times New Roman letter, italic and font size 9. Figures must be named and referenced in the article, in strict order. Every figure must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

Symbols

The symbols of the constants, variables and functions in Latin or Greek letters –included in the equations- must be in italic; the mathematical symbols and the numbers do not go in italic. The symbols must be identified immediately after the equation. Units, dimensions and symbols of the international system must be used.

When using acronyms or abbreviations, the complete equivalence should be written first, followed by the corresponding acronym or abbreviation in parenthesis and from there it is only written the respective acronym or abbreviation.

Bibliographic references

The adopted reference citation style by Tecnura journal is APA sixth edition. The cites, bibliographic references and infography are included in the last part of the article. The bibliographic references must be alphabetically ordered according to the author's first surname, without numbering.

There should only appear the cited references in the main body of the work, in tables or in figures. It means, in the list there should not appear other references although they have been consulted by the authors for the work preparation. We suggest using tools such as: Cites and bibliography from Microsoft Word (for APA sixth edition version 2013 or superior), Zotero, Mendeley, among others.

The call for a bibliographic reference is inserted in the text, at the pertinent point, under certain characteristics:

- If the sentence includes the author's surname, it should only be written the date into a parenthesis, for instance:
Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en
- When the author is not included in the sentence, surname and date must be into a parenthesis.
La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).
- If the document or work has more than two authors, the first cite must include all the surnames.
1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008)
- In the following mentions, it must only be written the author's first surname, followed by "et al.". En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que . . .
- When the document or work has more than six authors, it must be used from the first mention "et al."

Next it is described a series of examples of the more used references, according to the reference style adopted by Tecnura journal:

Periodical Publications:

Basic Form

Surnames, A. A., Surnames, B. B. & Surnames, C. C. (Date). Article's title. Title of the publication, volume (number), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

Basic article

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. Revista Tecnura, 18(42), 12-23. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01>

Web article

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHZ. Revista Tecnura, 18(42), 38-52. Recuperado de <http://revistas.>

Books:

Basic Form

Surnames, A. A. (Year). Title. City: Editorial.

Surnames, A. A. (Year). Title. Recovered from <http://www.xxxxxx.xxx>

Surnames, A. A. (Year). Title. doi: xx.xxxxxxxx

Surnames, A. A. (Ed.). (Year). Title. City: Editorial.

Book with author

Goleman, D. (2000). La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual. México: Ediciones B.

Book with editor:

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas.

Book electronic version:

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). Psychology of Liberation: Theory and applications. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/978-0-387-85784-8

Technical report:

Basic Form

Surnames, A. A. (Year). Title. (Report No. xxx). City: Editorial

Report with authors

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). U. S. Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico. (General Technical Report IITF-40). San Juan: International Institute of Tropical Forestry.

Report from a Government agency

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

Thesis

Basic form

Surnames, A. A. (Year). Title. (Unpublished master or doctorate thesis). Institution name, Location.

Unpublished thesis, printed

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

Commercial database thesis

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

Web thesis

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf

Standards or patents

Basic form

Surnames, A. A. Title of the patent. Country and number of the patente. Classification of the patent, date of official license. Number and date of patent request, pagination.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

ARTICLE SUBMISSION

Authors must submit their articles through the application Open Journal System in digital format, attaching the cover letter and the article-authors format.

Cover letter

The article must be submitted with a cover letter addressed to the director and editor of the journal, Engineer Alexander Jiménez Triana, including:

- Specific request to consider your article to be published in Tecnura journal.
- Full title of the article.
- Full names of all the authors of the paper.

-
- Certification of the originality and unpublished character of the paper.
 - Exclusivity of submission to Tecnura journal.
 - Authoring confirmation with signature of all the authors.

This letter must be signed by all the authors, scanned and sent with the remaining requested documents.

Article-authors information format

The article has to be submitted with an information format about the article and its authors which can be downloaded from the web page of Tecnura journal <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>, in the section "Forms and Documents". It is important to complete all the fields of information requested, some of them have comments to clarify better what is being requested. The format must not be scanned.

Article

Article in digital format (Word 2003 and later editions) that complies with all the presentation rules described in chapter three, "Article structure", of this guide of instructions for authors.

PUBLICATION PROCEDURE

The procedure to be followed by Tecnura journal for the evaluation and possible publication of the papers sent by the authors is the following in chronological order:

1. Delivery of the article with the cover letter and the information format by the authors.
2. Notification to the author about the reception of the article.
3. Verification of the presentation rules by the monitor of the journal.
4. Notification to the author about the evaluation of the presentation rules.
5. Submission of corrections made by the authors related to the evaluation of presentation rules.
6. Submission of the articles to the selected arbitrators.
7. Notification of the beginning of the arbitration process of the article.
8. Notification to the authors about the decision made by the editorial committee, and about the evaluations made by the arbitrators.
9. Delivery of the corrections made by the authors with respect to the evaluations made by the arbitrators.

10. Study of the final version of the article and the evaluations of the arbitrators by the editorial committee.
11. Delivery by the authors of the letter that surrenders right to the editor of the journal.
12. Submission of the version with style corrections and diagrammed to the authors.
13. Verification of errors and final approval of the version with style corrections and diagrammed by the authors.
14. Publication of the article in the corresponding number of Tecnura journal.
15. Notification to the authors of the number of interest.
16. Delivery of a copy of the journal to each one of the authors of the published article.

ARTICLE ARBITARION PROCESS

Considering the quarterly periodicity of the journal, the Editorial Committee makes four calls every year for the submission of articles, approximately in the months of February, May, August and November. The articles will be received until the date established in the call.

Once received the articles, the monitor of the journal will make an initial form evaluation to verify the completion of the elements mentioned in this guide of instructions to authors. After receiving again the article with the requested corrections by the journal's monitor, the paper will be submitted to evaluation by three academic peers (through time it is expected to include more external peers to participate in the process).

Each article sent to Tecnura journal is checked by two expert academic peers external to the institution of the authors, by a process of "Peer-review" of double blind, guaranteeing the anonymity of authors and evaluators; every paper sent is considered confidential and so it is demanded to evaluators.

Possible conclusions of the result of the evaluation by the judges are only three: publish the article without modifications, publish the article with modifications and not publish the article.

Subsequently, the Editorial Committee takes the decision to publish or not the articles, based on the results of the evaluations made by the assigned arbitrators. In case of contradictions in the evaluations with respect to the publication of an article, the editorial committee will send the article to a third peer and will be inclined for the two evaluations that have the same concept with respect to the publication of the article.

In each call the main author must suggest at least four possible external arbitrators to his work institution evaluators, who must be specialists in the specific topic of the article sent and must have at least Masters level, and at least two must to be international. Potential evaluators can belong to

a university or industry, public or private; their complete names must be provided, highest academic formation, institutional affiliation and e-mail. The editorial committee will analyze these four potential evaluators in order to enrich the database of arbitrators of Tecnura journal.

The Editorial Committee of Tecnura journal reserves the right to print, reproduce total or partially the article, as the right to accept or reject it. In the same way, it has the right to make any editorial modification that considers necessary; in this case the author will receive written recommendations from the evaluators. If accepted, authors must deliver the article with the suggested adjustments within the dates given by the journal to guarantee its publication in the programmed number.

CONTACT

For any additional information request, please send an e-mail to Tecnura journal tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com or by mail to Alexander Jiménez Triana, Director and Publisher of Tecnura Journal, to the following address:

Tecnura Journal
Journals Room, Block 5, Office 305.
Faculty of Technology
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur
Phone: 571-3239300 Extension: 5003
Bogotá D.C., Colombia

Email:

tecnura.ud@udistrital.edu.co

Web page:

<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>