

Vol. 17, Núm. 1 (2025)

ISSN(e): 2528-7788

# aci

avances  
en ciencias e  
ingenierías



**aci**

**avances**  
en ciencias e  
ingenierías

**ACI Avances en Ciencias e Ingenierías** es una revista científica internacional multidisciplinar de acceso abierto que publica contribuciones originales en inglés y español revisadas por pares en los ámbitos de las ciencias exactas, biológicas, ambientales e ingenierías, así como investigaciones interdisciplinarias en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (CTIM). La revista publica dos números anuales en los meses de mayo y diciembre, los cuales conforman el volumen correspondiente. Además, utiliza Open Journals System (OJS) y es publicada por USFQ Press.

#### **Editora en jefe**

Eva O.L. Lantsoght

Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador y  
Delft University of Technology, Países Bajos

#### **Editores asociados**

**Elisa Bonaccorso**

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

**Oscar Camacho**

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

**Edgar Carrera Jarrín**

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

**Dennis Cazar Ramírez**

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

**Mateo Dávila Jativa**

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

**Sebastián Ponce**

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

**Patricio Rojas Silva**

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

**Gabriel Trueba Piedrahíta**

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

**Nicolás Vela-García**

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

#### **Consejo editorial**

**Nikolay Aguirre** Universidad  
Nacional de Loja, Ecuador

**Ruth Mariela Alvarez**  
Universidad de Carabobo, Venezuela

**John Blake**  
University of Florida, Estados Unidos

**Diego F. Cisneros-Heredia**  
Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador

**Salvador Godoy**  
Instituto Politécnico Nacional, México

**Juan Manuel Guayasamín**  
Universidad San Francisco de Quito, Ecuador

**Johannio Marulanda Casas**  
Universidad del Valle, Colombia

**Oswaldo Morales Nápoles**  
Delft University of Technology, Países Bajos

**Yenisel Plasencia-Calaña**  
Maastricht University, Países Bajos

**Luis Rincón**  
Universidad de Los Andes, Venezuela

**Santiago Ron Pontificia**  
Universidad Católica del Ecuador, Ecuador

**Carlos Ventura**  
The University of British Columbia, Canadá

#### **Comité científico internacional**

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

**Carlos Jaime Barrios**  
Universidad Industrial de Santander, Colombia

**Daniel Cardoso**  
Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro, Brasil

**Sebastián Castellanos Toro**  
Universidad del Quindío, Colombia

**Rolando Chacón**  
UPC BarcelonaTECH, España

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

**Livio Conti**  
Università Telematica Internazionale Uninettuno, Italia

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

**Paula Folino**  
Universidad de Buenos Aires, Argentina

**Gabriela Guevara**  
Universidad Técnica de Berlín, Alemania

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

**Jaime Gonzalez-Libreros**  
Luleå Tekniska Universitet, Suecia

**Eloisa Hasing**  
University of Alberta, Canadá

**Jorge Humberto Heredia**  
Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador

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

**Victor Murray**  
Memorial Sloan-Kettering Cancer Center, Estados Unidos

**Francisco Javier Morales Yáñez**  
Universidad de Lieja, Bélgica

**Monica Santamaría-Ariza**  
University of Minho, Portugal

**Rafael Sanabria Díaz**  
Universidad Técnica de Delft, Países Bajos

**Rinaldo Santonico**  
Universidad de Roma Tor Vergata, Italia

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

**Luca Sorriso-Valvo**  
Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italia

**Raquel Quishpe**  
Instituto Tecnológico de Karlsruhe, Alemania

**Matías Valenzuela**  
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile

**Julio Valdivia-Silva**  
Universidad de Ingeniería & Tecnología, Perú

**Miguel Reina Ortiz**  
Universidad de Indiana, Estados Unidos

**Paula Rojas**  
Universidad Adolfo Ibáñez, Chile

**Catalina Palacios**  
SELVA, Colombia

#### **Producción editorial**

USFQ PRESS

#### **Corrección de estilo y ortotipográfica**

Alejandra Larrea y Reema Azar

#### **Diagramación y diagramación**

Krushenka Bayas Ramírez

#### **Fotografía de cubierta**

Freepik

#### **Webmaster y manejo de OJS**

Scimago



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

La información presentada en esta revista es de entera responsabilidad de sus autores. USFQ PRESS presume que la información es verdadera y exacta a la fecha de publicación. Ni la editorial ni los editores ni los autores dan una garantía, expresa o implícita, con respecto a los materiales contenidos en esta obra ni de los errores u omisiones que se hayan podido realizar.

#### **Para correspondencia, comunicarse con:**

Att. Eva Lantsoght, editora en jefe  
Universidad San Francisco de Quito USFQ  
Calle Diego de Robles S/N Pampite. Campus Santiago Gangotena  
Quito 170901, Ecuador.

#### **Correo electrónico:**

[avances@usfq.edu.ec](mailto:avances@usfq.edu.ec) - [usfqpress@usfq.edu.ec](mailto:usfqpress@usfq.edu.ec)

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

Directorios e índices de revistas académicas



Repositorios regionales y temáticos



Motores de búsqueda y grandes bases de datos



Servicios de apoyo a la publicación académica



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



Recursos de archivo



Plataformas



## Contenido

Vol. 17, Núm. 1 (2025)

### Editorial

#### **Beyond the Turing Test: The Human Role in the Future of Science**

Más allá del Test de Turing: El papel humano en el futuro de la ciencia

Dennis Cazar Ramírez

#### **Casos de estudio de climatología sinóptica ecuatorial.**

#### **Estudio de algunos casos relevantes del Ecuador continental**

Case studies of equatorial synoptic climatology. Study of some relevant cases of continental Ecuador

Tomàs Molina Bosch, Francisco Javier Méndez Bravo

#### **Hacia una agricultura resiliente al cambio climático: sistemas de riego inteligente y monitoreo de humedad del suelo para cultivos en la zona andina**

Toward climate-resilient agriculture: smart irrigation systems and soil moisture monitoring for crops in the Andean Region

Juan Sebastián Rhor, Dennis Cazar-Ramírez

#### **Análisis de las condiciones del transporte intracantonal combinado de la terminal Río Coca de Quito hasta las parroquias rurales que pertenecen a la Administración Zonal Tumbaco: Revisión bibliográfica**

Analysis of the conditions of combined intracantonal transportation from the Río Coca terminal in Quito to the rural parishes that belong to the Tumbaco Zonal Administration: Bibliographic review

Alisson Dayana Álvarez Fueres, Gabriela Solange Muñoz Abad, Fausto Alejandro Rodríguez Bravo, Mónica Susana Delgado Yáñez

#### **Diversidad de fitoplancton y estado trófico actual de un lago de alta montaña de la provincia de Imbabura, Ecuador**

Phytoplankton diversity and current trophic status of a high mountain lake in the province of Imbabura, Ecuador

Andrés Arévalo, Diana Ontaneda, Mabel Cadena

#### **Optimization of sourness and flavor in orange-flavored gummy candies using a simplex-lattice mixture design implemented with R**

Optimización de la acidez y del aroma en caramelos de goma con sabor a naranja utilizando un diseño de mezclas simplex-lattice implementado con R

Lizbeth Chávez-Reyes, Laura García-Curiel, Jesús Guadalupe Pérez-Flores, Emmanuel Pérez-Escalante, Elizabeth Contreras-López, Lizbeth Anahí Portillo-Torres, Luis Guillermo González-Olivares, Carlos Ángel-Jijón

#### **Diseño de un prototipo de batería de flujo redox de vanadio**

Design of a vanadium redox flow battery prototype

Laura E. de Jongh Salazar, José M. Barriola Damborenea, María E. Álvarez Bermúdez, Miguel M. Perez Hernández

#### **Empirical evaluation of parallel implementations of MergeSort**

Evaluación empírica de implementaciones paralelas de MergeSort

José E. Solsona, Sergio Nesmachnow

## **Efficiency in the classification of chest X-ray images through generative parallelization of the Neural Architecture Search**

Eficacia en la clasificación de imágenes de rayos X de tórax mediante la paralelización generativa de la búsqueda de arquitectura neuronal

Félix Armando Mejía Cajicá, John A. García Henao, Carlos Jaime Barrios Hernández, Michel Riveill

## **Study of syllogism in the paradigm of quantum logic**

Estudio del silogismo en el paradigma de la lógica cuántica

José David Bañuelos Aquino, José Antonio Orizaga Trejo

## **A temporal approach to urban crime forecasting using recurrent neural networks**

Un enfoque temporal para la predicción del crimen urbano usando redes neuronales recurrentes

Juan Pablo Perez Leal, Andrés Sebastián Ríos Gutiérrez, David Romo-Bucheli

## Beyond the Turing Test: The Human Role in the Future of Science

Dennis Cazar Ramírez<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Universidad San Francisco de Quito USFQ, Quito, Ecuador

\* Corresponding author: [dcazar@usfq.edu.ec](mailto:dcazar@usfq.edu.ec)

Seventy-five years ago, Alan Turing published his famous paper “Computing Machinery and Intelligence”, in which he posed the now-classic question: Can machines think? Since defining both “machine” and “think” in an unambiguous way is nearly impossible, Turing proposed an alternative approach now known as the imitation game. The core idea is that a machine and a human each try to convince a judge that they are human—the judge must then decide which is which.

With the advent of large language models (LLMs) such as ChatGPT, some claim that these tools have effectively passed the Turing Test. But does this really mean that machines can think? This claim raises profound questions and concerns in modern society, particularly in academia and the research world.

It is undeniable that machines can now perform many tasks traditionally associated with academic and scientific work—such as writing, data analysis, and literature review—more quickly and accurately than most human researchers. But does this imply that robots will soon replace humans in laboratories and research centers? Will machines be the ones making new discoveries and producing knowledge?

In my opinion, the answer is no. While AI tools are increasingly used to assist in scientific writing, data processing, and reference management, the creative and critical thinking that drives scientific progress still lies within human minds. Machines can accelerate and support research, but they cannot yet originate truly novel ideas, formulate hypotheses with intuition, or make the kind of conceptual leaps that define human innovation.

Critical thinking and professional ethics must remain the guiding principles for every researcher. It is essential to avoid the misconception that LLMs can generate knowledge in the same way humans do. Our responsibility is to assess when and how to use AI in research and always disclose its use to mitigate the risks of misuse and potential intellectual fraud.

Taking these aspects into account, we can conclude that, when used responsibly and ethically, AI significantly expands our capacity to develop innovative and original ideas in ways never before imagined. This progress will undoubtedly contribute to the advancement of science in the years to come.

Technology plays a fundamental role in enabling the development and deployment of AI tools. Running LLM-based applications requires massive data storage and extremely high computing power. This dependency presents new challenges: we must create and optimize algorithms that make the most efficient use of available infrastructure while minimizing energy consumption and other resource demands.



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Recibido /  
Received:  
12/05/2025

Publicado en línea /  
Published online:  
14/05/2025



High Performance Computing (HPC) techniques are central to addressing these challenges. Therefore, it is crucial that the scientific community in Latin America actively supports research and innovation in this field—not only to remain competitive globally, but also to develop technological solutions adapted to regional needs.

In this regard, scientific collaboration in Latin America has grown significantly. One notable example is SCALAC (Advanced Computing Systems for Latin America and the Caribbean), which promotes regional cooperation on HPC initiatives and applications.

This issue of *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* features selected works presented at the CARLA 2024 conference (Latin America High Performance Computing Conference). We are proud to contribute to the dissemination of knowledge in HPC and to support the development of this vital area of research in our region.

The articles cover a wide range of impactful applications developed by Latin American researchers, including the enhancement of medical diagnostic techniques through advanced image processing algorithms, foundational research in quantum computing, and the application of statistical models for urban crime forecasting. These contributions exemplify the creative and solution-driven work of a community committed to pushing the boundaries of science and technology in Latin America.

Supporting regional research initiatives, including scientific conferences and academic journals like *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* of Universidad San Francisco de Quito USFQ, plays a crucial role in strengthening the scientific and technological capacity of universities and research centers across Latin America. By building collaborative networks, sharing locally relevant knowledge, and creating platforms for visibility, we help ensure that young researchers and students have real opportunities to engage in high-level scientific work. Fostering a vibrant regional ecosystem of innovation not only elevates the global impact of Latin American science but also empowers the next generation to lead transformative research from within their own communities.

## Casos de estudio de climatología sinóptica ecuatorial. Estudio de algunos casos relevantes del Ecuador continental

Tomàs Molina Bosch<sup>1\*</sup>, Francisco Javier Méndez Bravo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universitat de Barcelona, Facultat de Física, Barcelona, Spain.

\*Autor correspondiente/Corresponding author, email: [tomasmolina@ub.edu](mailto:tomasmolina@ub.edu)

## Case studies of equatorial synoptic climatology. Study of some relevant cases of continental Ecuador

### Resumen

En países de latitudes medias se han realizado diversos catálogos para clasificar las situaciones sinópticas propias de la región. Sin embargo, en Sudamérica Tropical y Ecuador, las investigaciones sobre la clasificación de situaciones sinópticas son escasas. El objetivo de este trabajo es analizar casos de estudio sobre la influencia en Ecuador de las principales características climatológicas de Sudamérica Tropical, incluyendo la Zona de Convergencia Intertropical, el Anticiclón del Pacífico Sudoriental, el Anticiclón del Atlántico Norte y el Anticiclón del Atlántico Sur, así como los fenómenos meteorológicos El Niño y El Veranillo del Niño. La finalidad es desarrollar una clasificación de situaciones sinópticas específicas en superficie que afectan al Ecuador.

Para los casos de estudio, se procesaron e interpretaron reanálisis atmosféricas ERA-Interim del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a medio plazo, considerando las componentes horizontales del viento y la presión atmosférica en superficie, para los años 1998, 2000, 2018 y 2019. Se analizaron siete situaciones del tiempo en superficie en función de las ocho principales direcciones de la rosa de los vientos, tomando en cuenta la migración estacional, los cambios promedio en la ubicación y extensión de las características climatológicas y la influencia de los principales fenómenos meteorológicos. Se elaboraron mapas de presión atmosférica y de vectores del viento en superficie para Sudamérica Tropical y Ecuador continental, representando algunas de las principales advecciones sinópticas en superficie que afectan la región Costa y Oriente de Ecuador. Como resultado, se presenta una clasificación de situaciones sinópticas en superficie para estas regiones, basada en las principales características climatológicas sinópticas semipermanentes y en los fenómenos meteorológicos más representativos de Sudamérica Tropical.

**Palabras clave:** climatología sinóptica, Ecuador continental, clasificación de situaciones sinópticas, clima de Ecuador, reanálisis Atmosféricos ERA-Interim.

### Abstract

In mid-latitude countries, several catalogues have been developed to classify the synoptic situations typical of the region. However, research on the classification of synoptic situations in Tropical South America and Ecuador remains scarce. This study aims to analyze case studies regarding on the influence of the main climatological features of Tropical South America on Ecuador, including the Intertropical



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Fernando Nicolás Vela

Recibido /  
Received:  
11/11/2022

Aceptado /  
Accepted:  
02/10/2024

Publicado en línea /  
Published online:  
29/01/2025



Convergence Zone, the Southeast Pacific High, the North Atlantic High, and the South Atlantic High, as well as the meteorological phenomena El Niño and El Veranillo del Niño. The objective is to develop a classification of specific surface synoptic situations affecting Ecuador.

For the case studies, ERA-Interim atmospheric reanalyses from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts were processed and interpreted, considering horizontal wind components and surface air pressure for the years 1998, 2000, 2018, and 2019. Seven surface weather situations were examined based on the eight main wind rose directions, considering seasonal migration, average changes in the location and extent of climatological features, and the influence of major meteorological phenomena. Atmospheric pressure and surface wind vector maps of Tropical South America and continental Ecuador were generated, depicting some of the main synoptic surface advections affecting Ecuador's coastal and eastern regions. As a result, a classification of surface synoptic situations for these regions is presented, based on the primary semi-permanent synoptic climatological features and the most representative meteorological phenomena of Tropical South America.

**Keywords:** synoptic climatology, continental Ecuador, classification of synoptic situations, climate of Ecuador, ERA-Interim Atmospheric reanalyses.

---

## INTRODUCCIÓN

Diversos trabajos científicos han empleado la climatología sinóptica como una disciplina para obtener catálogos de situaciones sinópticas. En particular, en países localizados en latitudes medias, como Argentina [1], la península ibérica [2] y los Estados Unidos de Norteamérica [3].

La climatología sinóptica fundamenta su estudio en la comprensión de la atmósfera como una unidad física, relacionando tanto la circulación general como las características climatológicas regionales [4]. Los métodos empleados son experimentales; uno de los más utilizados es la elaboración de mapas de situaciones sinópticas [5].

Un catálogo de situaciones sinópticas constituye la clasificación ordenada de mapas de las situaciones sinópticas más representativas de una región. A su vez, una situación sinóptica es el conjunto de configuraciones de isobaras, líneas de corriente o vectores del viento, para un determinado instante, en un área superior a un millón de kilómetros cuadrados [6].

Un caso destacado, en la elaboración de catálogos sinópticos para la península ibérica, es el de los denominados "Los mapas del tiempo". Martín Vide simplifica la realidad atmosférica de la península ibérica en una clasificación de dieciséis situaciones sinópticas. Es preciso argumentar que, para el Ecuador, país de Sudamérica Tropical, no se ha evidenciado la elaboración de catálogos de situaciones sinópticas y trabajos científicos enfocados en la realización de análisis de situaciones sinópticas [7].



## Climatología sinóptica de Sudamérica Tropical y del Ecuador continental

Una investigación enfocada en el estudio de la convección, donde se procesaron imágenes del satélite geoestacionario GOES y los reanálisis de los Centros Nacionales para la Predicción Ambiental (NCEP) de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA), identificó y describió las principales características climatológicas de Sudamérica Tropical, para un periodo de 15 años. Una de las principales características analizadas fue la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), un sistema sinóptico semipermanente cuya dinámica varía en función de cada estación [8].

Esta zona de baja presión representa una de las características más importantes del acoplamiento termodinámico y dinámico de los hemisferios norte y sur. Identifica el ecuador (meteorológico), donde los alisios convergen y dan lugar a convección, nubosidad y precipitación [9]. La posición promedio de la ZCIT, en el Océano Pacífico Oriental, varía de manera estacional. En el invierno austral (invierno del hemisferio sur), se localiza a 10° N (norte máximo), mientras que, en el verano austral (verano del hemisferio sur), lo hace entre los 2.5° y 5.0° N (sur máximo). Su mayor intensidad la alcanza en el invierno austral y afecta a las costas de Ecuador y Colombia a través de ascensos de masas de aire, provocados por la convergencia en superficie [10].

Empleando los reanálisis del NCEP, de alta resolución (0.313°), un estudio llevado a cabo en la costa oeste de América del Sur sobre el Océano Pacífico Sudoriental describe, a escala sinóptica, la presencia semipermanente de un anticiclón denominado como "Anticiclón del Pacífico Sudoriental" (APSor) [11]. Esta característica climatológica, se encuentra limitada por el aumento de espesor de la troposfera ecuatorial. Este anticiclón es el responsable de impulsar el viento hacia la Costa del Ecuador, a través de una gran porción de la costa de Sudamérica [12].

A lo largo del año, el centro del APSor cambia de posición e intensidad. Longitudinalmente, lo hace de manera ligera en ubicación (100°W - 90°W) e intensidad (1021 - 1024 hPa), siendo un poco más intenso en primavera. Este ligero cambio en longitud explica el motivo por el cual el APSor se emplaza principalmente sobre el océano Pacífico Sudoriental [11]. Los cambios en la latitud del APSor son estacionales, marcados y están en comunión con la ZCIT. De este modo, en el invierno austral, el centro del APSor se localiza a 27° S (norte máximo), mientras que, en el verano austral, se ubica en los 35° S (sur máximo). Avanza y retrocede durante la transición entre el invierno y el verano [13].

Aunque se localicen a gran distancia del Ecuador, tanto el anticiclón del océano Atlántico Norte (AAN), como el anticiclón del océano Atlántico Sur (AAS), son características importantes en la climatología sinóptica de Sudamérica Tropical. Estos son la fuente principal de los vientos alisios (vientos del noreste y sureste), que constantemente atraviesan la región amazónica del Ecuador y alcanzan la vertiente oriental de la cordillera de los Andes, generando ascensos, humedad y precipitaciones [14].

Los vientos alisios siguen los gradientes de presión entre los AAN y AAS, que varían a lo largo del año. Ambos anticiclones, ganan y pierden extensión e intensidad en función de las estaciones y de manera sincrónica. En los meses de julio y agosto (invierno austral), los anticiclones presentan su mayor extensión e intensidad; en febrero, una dimensión



promedio, y su mínimo absoluto lo alcanzan en marzo y octubre. El exceso de presión generado entre julio y agosto sobre el océano Atlántico Tropical produce un gradiente de presión zonal que deriva en situaciones sinópticas particulares con advecciones en superficie del este en el Ecuador [15].

El fenómeno de El Niño y la Oscilación del Sur (ENSO) representan fenómenos oceanográficos y atmosféricos de importancia en la variabilidad climática interanual del océano Pacífico Tropical. Inciden en la circulación atmosférica general y en el aumento o disminución de las precipitaciones en los países de la costa oeste de Sudamérica. Se reconocen dos fases durante este evento: una fase fría, La Niña, y una cálida, El Niño [16].

La fase fría, La Niña, produce cambios muy ligeros en la configuración de la dinámica oceanográfica y atmosférica de la región con la presencia de vientos alisios sobre el Oriente del Ecuador. Por el contrario, El Niño modifica de forma drástica las características climáticas de la región, ya que se produce de manera periódica durante el verano austral y afecta principalmente a la Costa Ecuatoriana [17].

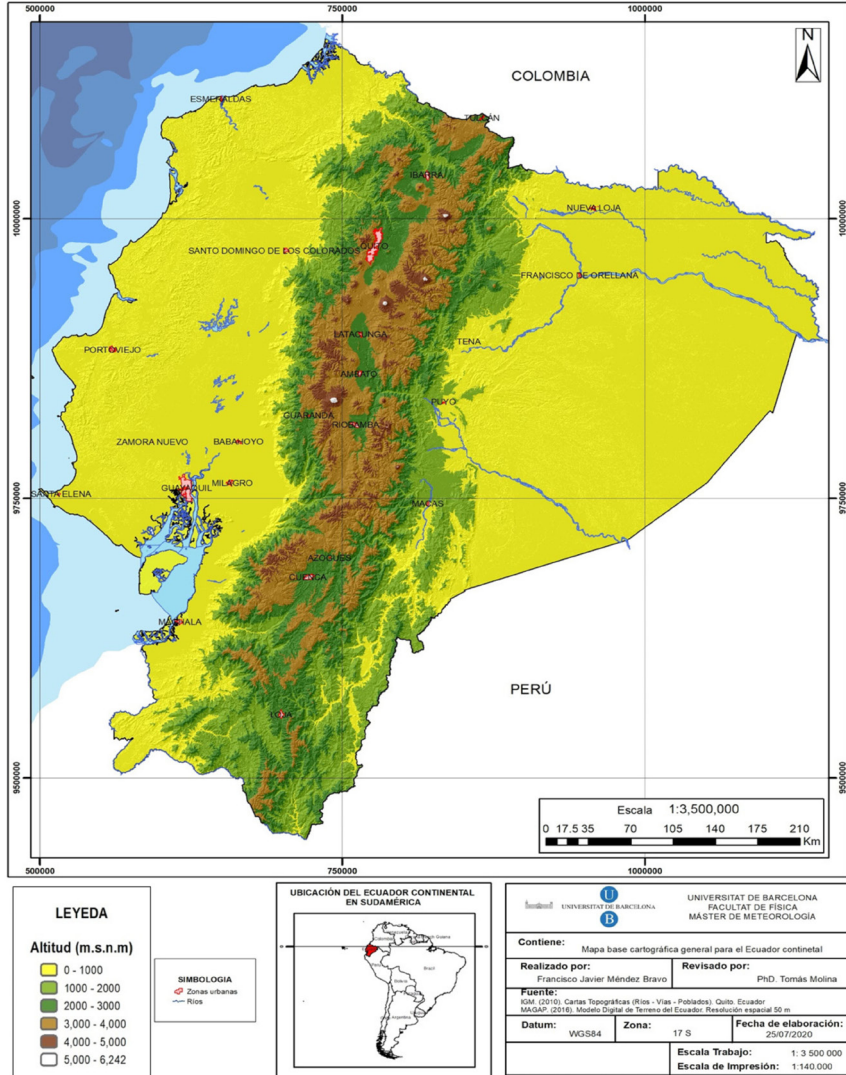
Cuando el APSor se desplaza hacia el SO, los alisios pierden intensidad y la ZCIT ubicada en su sur máximo genera advecciones del oeste húmedas y cálidas. Estas alcanzan a la vertiente occidental de la cordillera de los Andes y producen precipitaciones intensas que derivan en inundaciones de gran impacto para la Costa ecuatoriana [18].

El Veranillo del Niño, denominado así por agricultores del Sur del Ecuador, es un fenómeno meteorológico particular que sucede de manera ocasional, normalmente durante las tres primeras semanas de noviembre [15]. La presencia de un gradiente de presión, en fuerte aumento hacia el océano Pacífico y los alisios debilitados más de lo habitual, producen una situación sinóptica del norte en la región suroriente del Ecuador.

## Ubicación, descripción geográfica y climatológica del Ecuador continental

Como se observa en la Figura 1, el Ecuador continental pertenece a Sudamérica Tropical, se ubica en la zona ecuatorial y está atravesado por la línea equinoccial [19] y [20]. Tanto la región Costa como el Oriente del Ecuador se localizan entre los 0 y 1000 m.s.n.m; mientras que la región sierra se sitúa entre los 1000 y 6242 m.s.n.m (altitud del volcán Chimborazo), como se aprecia en la Figura 1. Esta marcada diferencia de altitud, entre las regiones Costa y Oriente, en comparación con la Sierra ecuatoriana, caracteriza y diferencia la geomorfología, biogeografía y climatología del paisaje geográfico del Ecuador.

La cordillera de los Andes actúa como una barrera orográfica longitudinal de elevada altitud y se convierte en una verdadera división climática en el Ecuador. Esta barrera, en gran medida, impide que el viento en superficie atraviese zonalmente por completo al país, ya que las montañas de la sierra ecuatoriana impiden su paso [21].

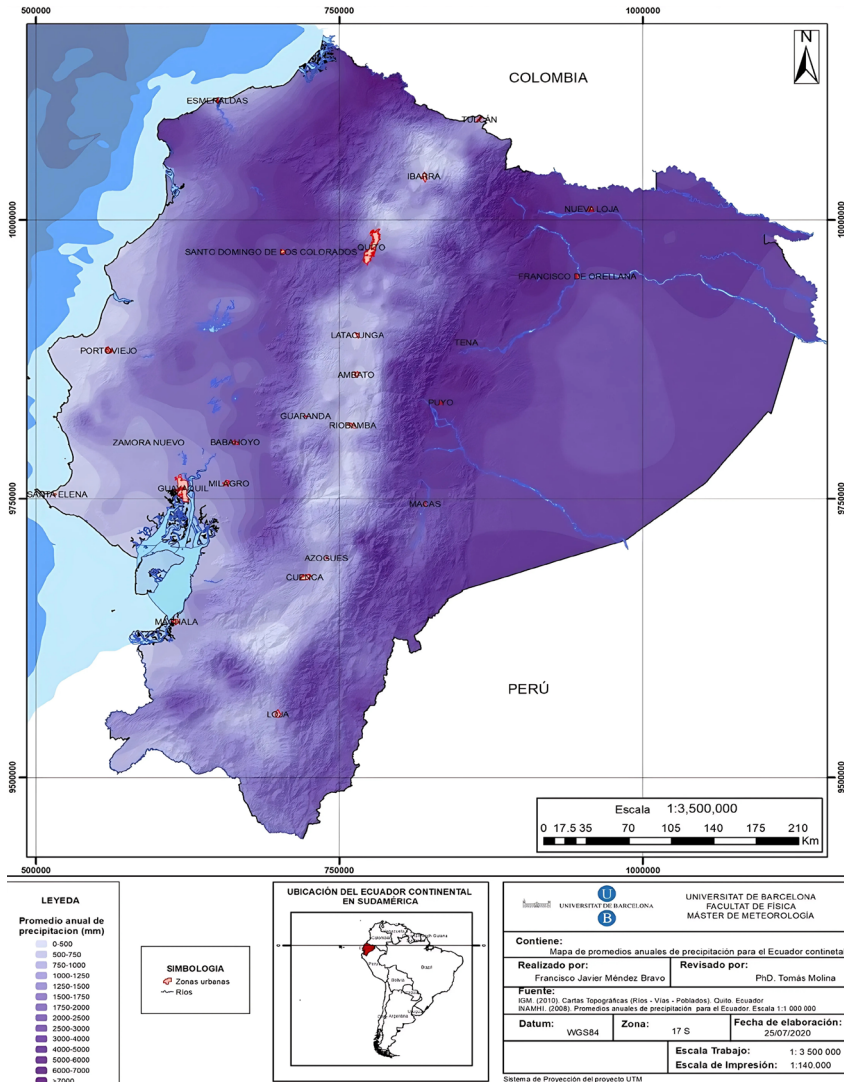


**Figura 1.** Mapa de localización geográfica y principales elementos cartográficos del Ecuador continental. Información cartográfica proporcionada por [19] y [20]. Mapa elaborado por: MSc. Francisco Javier Méndez Bravo.

Se crean así, dos regiones climáticas donde el viento en superficie puede ingresar con facilidad: la Costa y el Oriente ecuatoriano. Debido a su posición geográfica y a la configuración de las características climatológicas de gran escala, la costa permite el ingreso del viento en superficie del oeste, y el oriente permite el ingreso del viento en superficie del este del Ecuador [15]. El presente trabajo analiza y describe el viento sinóptico en superficie del Ecuador. Por este motivo, su estudio se enfoca en la región Costa y Oriente del Ecuador.



En determinadas situaciones sinópticas, la ubicación y la marcada altitud de la cordillera de los Andes permite el ascenso de las masas de aire que provienen tanto del Océano Pacífico como de la región Amazónica. Esto provoca la generación de nubes que derivan en precipitaciones abundantes sobre las vertientes externas de la cordillera de los Andes [22]. Esto se puede observar en la Figura 2, referente a la distribución espacial de la precipitación media anual en el Ecuador.



**Figura 2.** Mapa de promedio anual de precipitación del Ecuador continental para el año 2008. Información proporcionada por [19] y [22]. Mapa elaborado por: MSc Francisco Javier Méndez Bravo.



En materia de recursos hídricos, Ecuador es un país abundante. La escorrentía específica anual alcanza aproximadamente los 1650.7 mm/año, cifra superior a la media mundial de 300 mm/año [23]. Debido a características ambientales, demográficas y socioeconómicas particulares, su población es vulnerable a fenómenos hidrometeorológicos tales como inundaciones, deslizamientos y sequías [24]. Del total de desastres naturales que afectaron al país en su historia, el 59 % fueron de origen climático. Se registraron inundaciones y sequías, lo que derivó en pérdida de vidas y bienes en la población [25].

La costa oeste de Sudamérica no dispone de un monitoreo sistemático a largo plazo de variables meteorológicas. El viento en superficie, una de las variables más importantes para este estudio, no es monitoreado [26]. Por su parte, el Ecuador dispone de una red de estaciones meteorológicas limitada y distribuida de forma irregular por el territorio nacional, y no dispone de radares meteorológicos [7].

El objetivo de la presente investigación es analizar casos de estudio sobre la afectación al Ecuador continental de las principales situaciones climatológicas de la zona, antes mencionadas: Zona de convergencia intertropical (ZCIT), Anticiclón del Pacífico Sudoriental (APSor), Anticiclón del Atlántico Norte (AAN), Anticiclón del Atlántico Sur (AAS); además de los fenómenos El Niño y El Veranillo del Niño para elaborar una clasificación de situaciones sinópticas específicas en superficie que afectan al Ecuador continental.

## METODOLOGÍA

En este trabajo se estudiaron algunas de las principales características climatológicas y de fenómenos meteorológicos que afectan al Ecuador continental. Se ha utilizado la rosa de los vientos como herramienta de análisis de nuestros casos de estudio de situaciones sinópticas típicas de la zona [11].

Considerando los limitados datos climáticos propios del Ecuador, nuestro estudio se realizó utilizando los reanálisis ERA-Interim producido por el *Centro Europeo de Pronóstico Meteorológico a Medio Plazo (ECMWF)*. Los reanálisis asimilan datos en superficie y en la vertical; además, utilizan los satélites para proporcionar la mejor aproximación del estado atmosférico, múltiples veces al día. Se encuentran disponibles al público por periodos de varias décadas desde 1979 hasta 2019 [27].

Se analizó la circulación general atmosférica y se identificaron las principales características climatológicas de Sudamérica Tropical que influyen en la climatología sinóptica del Ecuador [28]. Se estudiaron las migraciones estacionales de cada característica climatológica y se determinaron las ubicaciones y extensiones promedio más extremas.

De manera particular, se analizó el comportamiento de la Oscilación del Sur, en su fase positiva, fenómeno El Niño, y su influencia en la climatología sinóptica del Ecuador. De la misma manera, se estudió el fenómeno Veranillo del Niño y se identificaron los periodos de máxima intensidad de estos fenómenos meteorológicos [29].



A través de la literatura consultada, enmarcamos en nuestra área de estudio las principales características climatológicas que afectan al Ecuador continental y la ubicación e intensidad de cada característica como consecuencia de su migración estacional (ver tablas 1 y 2) [8, 10, 11, 13].

**TABLA 1.** Ubicación media de las principales características climatológicas de Sudamérica Tropical que influyen en el Ecuador continental, en función de su migración estacional. El color rojo identifica el invierno austral, el azul el verano austral y el gris el período de transición del verano a invierno.

	Norte máximo	Intermedio	Sur máximo
ZCIT	Invierno austral	Transición	Verano austral
APSor	Invierno austral	Transición	Verano austral
AAN	Verano austral	Transición	Invierno austral
AAS	Invierno austral	Transición	Verano austral

**TABLA 2.** Intensidad media de las principales características climatológicas de Sudamérica Tropical que influyen en el Ecuador continental, en función de su migración estacional. El color rojo identifica el invierno austral, el azul el verano austral y el gris el período de transición del verano a invierno.

	Intensidad máxima	Intermedia	Intensidad mínima
ZCIT	Invierno austral	Transición	Verano austral
APSor	Invierno austral	Transición	Verano austral
AAN	Invierno austral	Transición	Verano austral
AAS	Invierno austral	Transición	Verano austral

Se identificaron dos situaciones sinópticas en superficie para episodios relevantes en Ecuador continental de El Niño y Veranillo del Niño.

En el año 1998, se registró uno de los Fenómenos de El Niño más intensos de las últimas décadas del Ecuador. Afectó principalmente a la Costa del país, con precipitaciones intensas que ocasionaron desastres naturales [18].

En el año 2000, en el sur del país, se registró uno de los más marcados Veranillo del Niño, que ocasionó sequías en esta región [15].

Para el estudio de las características climatológicas referidas en las Tablas 1 y 2, se eligieron los años 2018 y 2019, ya que comprenden los últimos años del conjunto de datos del reanálisis ERA-Interim del ECMWF. Estos constituyen los datos más actuales y completos hasta la fecha de elaboración de la presente investigación.

El presente trabajo se realizó utilizando los datos diarios de los meses de febrero, marzo, agosto y noviembre de las variables meteorológicas de interés. Se trabajó con los años 1998, 2000, 2018 y 2019, y se identificaron y escogieron las situaciones sinópticas en superficie más representativas para la región Costa y Oriente del Ecuador.



En principio, se trabajó con los reanálisis atmosféricos más antiguos, pertenecientes al NCEP/NCAR de la *Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos* (NOAA), cuyo paso de malla es de  $2.5^\circ$  (aproximadamente 250 km) [30].

Posteriormente, para mejorar la resolución espacial de los datos, se trabajó con los reanálisis del ECMWF que presentan un paso de malla de  $0.75^\circ$  (aproximadamente 80 km). Dado que el estudio es de escala sinóptica y abarca el análisis de características climatológicas, dicha resolución espacial es adecuada para satisfacer las necesidades del trabajo.

Los datos de los reanálisis ERA-Interim se obtuvieron con una resolución espacial de  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ . Los datos extraídos son diarios para las 18:00 UTC (12:00 hora local del Ecuador continental) tanto como para las componentes horizontales del viento  $u$  y  $v$  a 10 metros, así como para la presión atmosférica en superficie. Los datos fueron obtenidos en formato netCDF.

La visualización de los datos de cada variable meteorológica se realizó utilizando el programa Panoply versión 4.11.6, elaborado por el *Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio de los Estados Unidos de Norte América* (NASA).

Panoply es un visor de datos netCDF, que permite visualizar datos de variables meteorológicas en mapas y los guarda en imágenes JPG o como archivos gráficos PDF. Este programa presenta una herramienta que combina dos matrices georreferenciadas de datos, en una sola matriz de datos. Esto lo consigue al procesar cada dato a través de un determinado algoritmo como diferenciar, sumar o promediar.

Utilizando esta herramienta se elaboraron los mapas de vectores de viento horizontal a 10 metros, combinando las matrices de las componentes horizontales  $u$  y  $v$  del viento. Los mapas de presión en superficie se realizaron visualizando cada variable en el programa.

Se elaboraron mapas a escala regional (Sudamérica tropical) y luego a escala local (Ecuador continental), posteriormente y de estos mapas, se seleccionaron los mapas apropiados para cada caso de estudio específico correspondiente a cada situación sinóptica típica en superficie propia del Ecuador continental.

Estos mapas de vectores del viento en superficie constituyen una herramienta útil para elaborar pronósticos meteorológicos orientativos a escala sinóptica. Si se determinan las advecciones típicas en superficie del oeste en la Costa y del este en el Oriente del Ecuador, que alcanzan a la cordillera de los Andes, es posible identificar ascensos orográficos y áreas propensas a precipitaciones.

La selección de cada caso de estudio específico de situaciones sinópticas es de tipo subjetivo. Así, se presenta un conjunto de situaciones sinópticas que los investigadores identificaron mediante el estudio de las principales características climatológicas y fenómenos meteorológicos en superficie de Sudamérica Tropical, los cuales influyen de forma particular en la región Costa y Oriente del Ecuador continental. Además, se consideraron los patrones estacionales de las características climatológicas y fenómenos meteorológicos.



Se identificaron patrones en la migración latitudinal del Anticiclón del Pacífico Sudoriental (APSor), que están sincronizados al desplazamiento latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). De igual manera, se incorporó al análisis los anticiclones del Atlántico Norte y Sur que están sincronizados estacionalmente a la dinámica del APSor y la ZCIT.

Debido a sus condiciones particulares, tanto el fenómeno El Niño como El Veranillo del Niño fueron analizados de forma particular. Sus situaciones sinópticas en superficie se incorporaron y se analizaron las posibles configuraciones de las características climatológicas sinópticas que dieron lugar a estos eventos.

## RESULTADOS

### **Análisis de casos de situaciones sinópticas específicas en superficie que afectan al Ecuador continental**

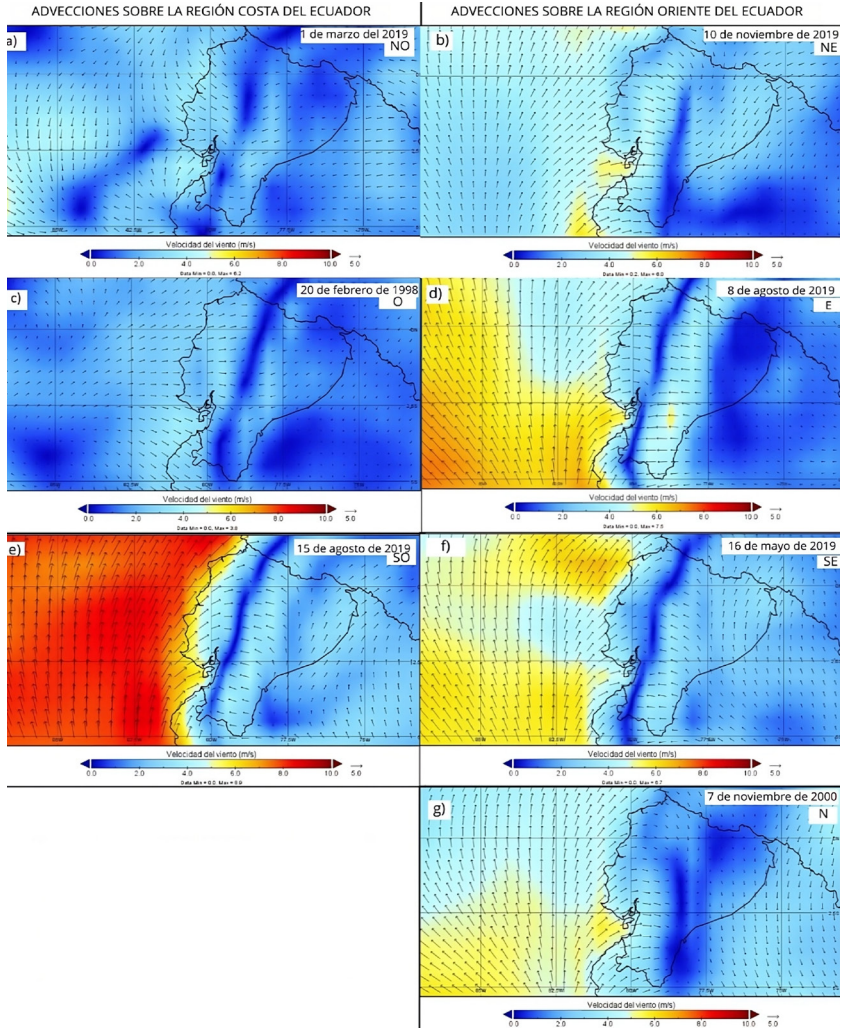
El análisis se realizó en función de la migración estacional de las principales características climatológicas y de los fenómenos meteorológicos que más influyen en Ecuador continental.

Se consideraron y analizaron como zonas particulares e independientes a la región Costa y Oriente ecuatoriano. Aunque las dos zonas se representen en un mismo mapa, cada una fue estudiada de manera independiente.

Como se observa en la Figura 3, en función de la migración estacional de las principales características climatológicas, se identificaron cinco situaciones sinópticas específicas en superficie del: noreste, este, sudeste, sudoeste, noroeste.

Al mismo tiempo, en función de los fenómenos meteorológicos que más influyen en el Ecuador continental, se identificaron dos situaciones sinópticas específicas en superficie: una del norte y la otra del oeste.

En total, se obtuvieron siete situaciones sinópticas específicas del viento en superficie. Estas se producen en la región Costa o en el Oriente del Ecuador. En los casos de estudio analizados, no apareció ninguna situación de viento del sur. A continuación, se presenta el análisis climatológico sinóptico que sustenta la existencia de cada una de las situaciones sinópticas específicas indicadas en la Figura 3.



**Figura 3.** Clasificación de situaciones sinópticas en superficie para el Ecuador continental. Mapas de vectores de velocidad y dirección del viento en superficie del Ecuador para cada fecha, a las 13:00 h (Ecuador continental). Información obtenida de los reanálisis ERA Interim (ECMWF). a) Advección del NO en la Costa del Ecuador; b) Advección del NE en el Oriente del Ecuador; c) Advección del O en la costa del Ecuador; d) Advección del E en el Oriente del Ecuador; e) Advección del SO en la Costa del Ecuador; f) Advección del SE en el Oriente del Ecuador; g) Advección del N en el Oriente del Ecuador. Mapas elaborados por MSc Francisco Javier Méndez Bravo.

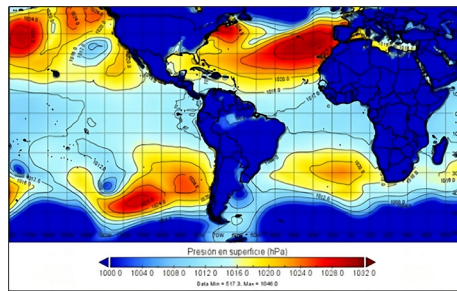
### Situaciones sinópticas en superficie, en función de la migración estacional

#### *Situaciones de verano austral*

Para el verano austral, se observó sobre la región Costa del Ecuador, el dominio de la advección del noroeste (NO).

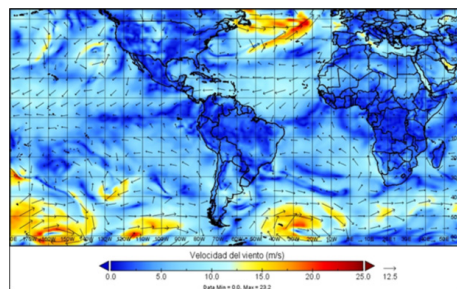
### Advección del noroeste (NO)

Como se observa en la Figura 4, el centro del APSor se localiza en su posición sur máximo con intensidad mínima. El centro del AAN se encuentra al norte, debilitado en su parte occidental. La configuración sinóptica completa el AAS, que localiza su centro en su sur máximo y su intensidad es mínima.



**Figura 4.** Presión atmosférica en superficie normalizada de Sudamérica Tropical para el 1 de marzo de 2019 a las 13:00 h (Ecuador continental). Información obtenida de los reanálisis ERA- Interim. Mapa elaborado por MSc Francisco Javier Méndez Bravo.

La Figura 5 describe la posición de la ZCIT sobre el océano Pacífico Oriental, y se ubica en su sur máximo con intensidad mínima.



**Figura 5.** Vectores de velocidad y dirección del viento en Sudamérica Tropical para el 1 de marzo de 2019 a las 13:00 h (Ecuador continental). Información obtenida de los reanálisis ERA- Interim. Mapa elaborado por MSc Francisco Javier Méndez Bravo.

Como se observa en la Figura 3 a), con la ubicación e intensidad de los anticiclones y de la ZCIT descrita anteriormente, en la región Costa del Ecuador, el 1 de marzo de 2019, se describe la presencia de advección del NO.

### Situaciones de invierno austral

Durante el invierno austral se evidenciaron dos advecciones de viento en superficie del este y del suroeste.

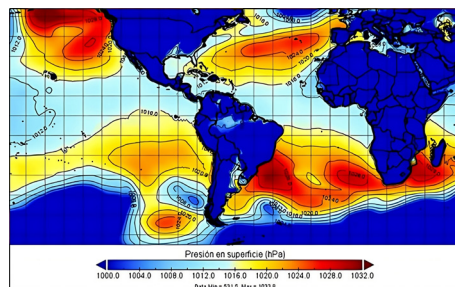
Como se observa en la Figura 3 d), la advección del este es un caso particular que sucede sobre la región amazónica del Ecuador. Este es el resultado estacional del comportamiento de los anticiclones del océano Atlántico entre los meses de julio y agosto, cuando alcanzan su mayor extensión e intensidad.

El centro del AAN se ubica en su posición sur máximo y el del AAS su norte máximo. La proximidad entre los dos anticiclones en el océano Atlántico genera flujo de viento superficial del este que alcanza la Amazonía ecuatoriana.

A continuación, como ejemplo de una situación de invierno austral, se describe la advección del SO.

#### **Advección del Suroeste (SO)**

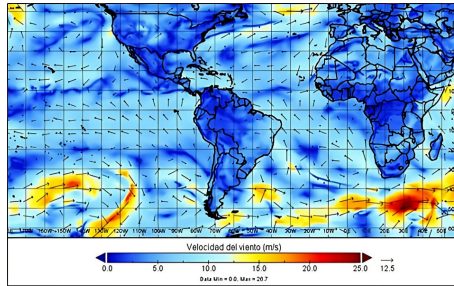
Como se observa en la Figura 6, el centro del APSor se localiza en su norte máximo con intensidad máxima. El centro del AAN se encuentra al sur en su parte oriental, fortalecido, y el centro del AAS localiza su centro en el norte máximo y su intensidad es máxima.



**Figura 6.** Presión atmosférica en superficie normalizada de Sudamérica Tropical para el 15 de agosto de 2019 a las 13:00 h (Ecuador continental). Información de los reanálisis ERA- Interim. Mapa elaborado por MSc Francisco Javier Méndez Bravo.

En la Figura 7, la ZCIT se ubica sobre el Pacífico Oriental en su norte máximo con intensidad máxima. El 15 de agosto de 2019 a las 13:00 h, se observó la ubicación e intensidad de los anticiclones y de la ZCIT descrita anteriormente.

Como se observa en la Figura 3 e), y como resultado de esta configuración sinóptica, sobre la región Costa del Ecuador se obtuvo una advección en superficie del suroeste (SO), provenientes del océano Pacífico.



**Figura 7.** Vectores de velocidad y dirección del viento de Sudamérica Tropical para el 15 de agosto de 2019 a las 13:00 h (Ecuador continental). Información de los reanálisis ERA- Interim. Mapa elaborado por MSc Francisco Javier Méndez Bravo.

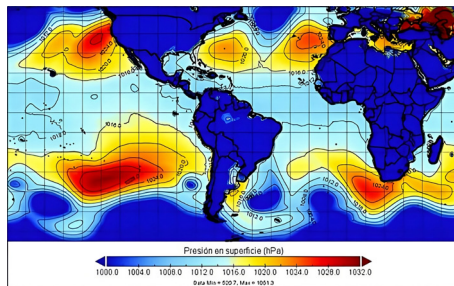
### **Situaciones de transición estacional**

En primavera austral se observó advecciones en superficie del noreste (NE) y en el otoño austral advecciones de viento en superficie sudeste (SE), los denominados “vientos alisios”. Estas situaciones afectaron a la región amazónica.

A continuación, como ejemplo, se describe la advección del noreste (NE).

### **Advección del Noreste (NE)**

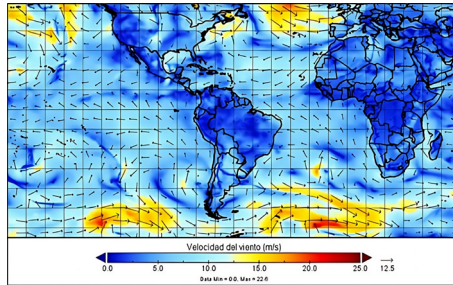
En la Figura 8, se observa al centro del APSor, AAN y AAN localizados en posición intermedia y con intensidad media. El AAN se encuentra dividido en dos anticiclones de intensidad media.



**Figura 8.** Presión atmosférica en superficie normalizada en Sudamérica Tropical para el 10 de noviembre de 2019 a las 13:00 h (Ecuador continental). Información de los reanálisis ERA- Interim. Mapa elaborado por MSc Francisco Javier Méndez Bravo.

La Figura 9, muestra la ZCIT en el Pacífico Oriental en posición intermedia con intensidad media.

En la Figura 3 b), el 10 de noviembre de 2019 a las 13:00 h, se observa esta situación sinóptica en superficie del NE, sobre la región amazónica del Ecuador.



**Figura 9.** Vectores de velocidad y dirección del viento en Sudamérica Tropical para el 10 de noviembre de 2019 a las 13:00 h (Ecuador continental). Información de los Reanálisis ERA- Interim. Mapa elaborado por MSc Francisco Javier Méndez Bravo.

### Situaciones sinópticas en superficie en función de los fenómenos meteorológicos

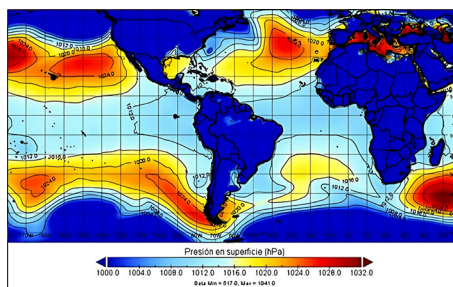
Se observaron dos advecciones: la primera del oeste sobre la Costa ecuatoriana durante el fenómeno de El Niño de 1998 y la segunda del norte en la región suroriental del país durante el fenómeno El Veranillo del Niño.

#### *Situaciones sinópticas durante El Niño*

La Figura 10 muestra el núcleo del APSor en su posición sur máxima. Este presenta una forma alargada zonalmente y se observa avance limitado sobre las costas de Sudamérica.

El AAN y AAS se localizan en su posición intermedia y presentan intensidad media. La ZCIT se ubica sobre el Ecuador con máxima intensidad.

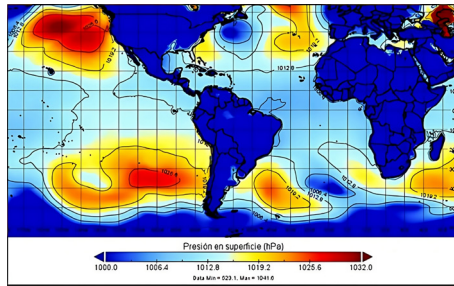
Con estas características climatológicas configuradas, y como se observa en la Figura 3 c), el 20 de febrero de 1998, en la Costa del Ecuador se observó advección del oeste (O).



**Figura 10.** Presión atmosférica en superficie normalizada en Sudamérica Tropical para el 20 de febrero de 1998 a las 13:00 h (Ecuador continental). Información de los reanálisis ERA- Interim. Mapa elaborado por MSc Francisco Javier Méndez Bravo.

#### *Situaciones sinópticas del Veranillo del Niño*

La Figura 11 muestra el centro del APSor ubicado en su posición intermedia con intensidad media. El AAN se localiza en su norte máximo totalmente debilitado, mientras que el AAS está en su posición sur máxima con intensidad baja.



**Figura 11.** Presión atmosférica en superficie normalizada en Sudamérica Tropical para el 7 de noviembre de 2000 a las 13:00 h (Ecuador continental). Información de los reanálisis ERA- Interim. Mapa elaborado por MSc Francisco Javier Méndez Bravo.

La ZCIT sobre el océano Pacífico Oriental se encuentra desfigurada y con intensidad media. Como se observa en la Figura 3 g), el 7 de noviembre de 2000, en la región suroriente del Ecuador se registró advección del norte (N).

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A la luz del análisis de los resultados obtenidos para nuestros casos de estudio, se elaboró una clasificación de situaciones sinópticas específicas en superficie que afectan al Ecuador continental. En la línea de otros autores que han presentado resultados para latitudes medias [6], este trabajo se centra en latitudes tropicales y en un menor número de datos disponibles. Al igual que otros estudios sobre climatología sinóptica en latitudes tropicales, se buscó la influencia cercana de las anticiclones semipermanentes que influyen en el clima del Ecuador y en la dirección del viento en superficie en el Ecuador continental [31] y [32].

La cordillera de los Andes, se consolida como una verdadera barrera orográfica, que obstaculiza la libre circulación zonal del viento en superficie en el Ecuador continental. Su localización geográfica y su elevada altitud (1000-6242 m.s.n.m.) divide al Ecuador continental en tres zonas climáticas independientes: la Costa, la Sierra y el Oriente.

A pesar de la distancia a la que se localizan las principales características climatológicas de Sudamérica Tropical (ZCIT, APSor, AAN y AAS), estas influyen de forma directa en la configuración sinóptica del viento en superficie del Ecuador continental.

Se evidencia la existencia de un patrón estacional en el comportamiento de las características climatológicas (Ver tabla 3). De manera sincrónica, en el invierno austral, todas las características presentan intensidad máxima, en el verano austral presentan intensidad mínima y en periodo de transición entre el verano/invierno austral presentan intensidad media.

**TABLA 3.** Situaciones sinópticas específicas en superficie relacionadas con las características climatológicas en función de su migración estacional.

Característica climatológica	UBICACIÓN			INTENSIDAD			ESTACIÓN	ADVECCIÓN COSTA	ADVECCIÓN ORIENTE
	Norte máximo	Intermedia	Sur máximo	Máxima	Media	Mínima			
ZCIT	Rojo			Rojo			Invierno Austral	SO	E
APS	Rojo			Rojo					
AAN			Rojo	Rojo					
AAS	Rojo			Rojo					
ZCIT		Gris			Gris		Transición	NO, SO	NE, SE
APS		Gris			Gris				
AAN		Gris			Gris				
AAS		Gris			Gris				
ZCIT			Azul			Azul	Verano Austral	NO	NE
APS			Azul			Azul			
AAN	Azul					Azul			
AAS			Azul			Azul			

Esta tabla relaciona la ubicación e intensidad de cada característica climatológica en función de la estación del año. El color rojo identifica al invierno austral, el azul al verano austral, el gris identifica el periodo de transición entre el invierno y el verano. Las letras en mayúsculas son acrónimos de cada característica climatológica.

De manera estacional y sincrónica, las características climatológicas determinan cinco situaciones sinópticas específicas de viento en superficie en función del verano austral, invierno austral y el periodo de transición invierno/verano. Determinan advecciones del SO y NO en la región Costa y NE, E y SE en el Oriente del Ecuador.

Las principales situaciones sinópticas de viento en superficie propias del invierno austral son dos: advecciones del SO y E. El invierno austral, en promedio, se caracteriza por presentar los anticiclones subtropicales (AAN y AAS) con máxima intensidad y localizados de forma extensa orientados hacia la línea equinoccial. La ZCIT se ubica en su posición norte máximo con intensidad máxima.

El verano austral presenta principalmente situaciones sinópticas de viento en superficie del NO sobre la Costa ecuatoriana. Los anticiclones subtropicales (AAN y AAS) se disponen alejados de la línea equinoccial, cubren áreas de poca extensión y se encuentran debilitados en intensidad. La ZCIT se ubica en su posición sur máximo con intensidad mínima.



El periodo de transición entre el invierno y el verano austral implicó la presencia de situaciones sinópticas de viento en superficie del NE y SE (vientos alisios) sobre el Oriente ecuatoriano. La primavera austral registró advecciones del NE, mientras que el otoño austral registró advecciones del SE. La ZCIT y los anticiclones subtropicales (AAN y AAS) presentaron intensidad media.

Dentro del objetivo del análisis de casos de estudio para los fenómenos de El Niño y el Veranillo del Niño, en la línea de otros autores analizamos las principales situaciones climáticas de la zona y el viento en superficie para caracterizar dichos fenómenos [33] y [34].

El fenómeno El Niño de febrero de 1998, presentó situaciones sinópticas del viento en superficie del O (situación propia de este fenómeno). La ZCIT se mostró fortalecida y se ubicó en el Ecuador. El APSor se encontró intenso en su sur máximo y los AAN y AAS presentaron posición intermedia.

El fenómeno La Niña produce advecciones del NE y SE en la Amazonía del Ecuador. No aportó a la clasificación con situaciones sinópticas en superficie nuevas.

El fenómeno Veranillo del Niño se caracterizó por presentar situaciones sinópticas de viento en superficie del N en el suroriente del Ecuador. Consecuencia de anticiclones subtropicales (AAN y AAS) debilitados y la ZCIT desfigurada con intensidad media.

De las situaciones sinópticas específicas de viento en superficie, no se encontró evidencia de la advección del Sur. Es posible que, analizando la climatología sinóptica en altura, como la disposición de dorsales y vaguadas subtropicales, la presencia ocasional de una baja en superficie sobre el noroccidente del Brasil, o la oscilación de Madden y Julian (MJO), se pueda identificar y caracterizar esta situación.

En el Ecuador continental no se han realizado trabajos de análisis de situaciones en mesoescala. En futuros trabajos, se pretende continuar analizando situaciones de mesoescala como la Alta de Bolivia y las perturbaciones (convección) de la Amazonía.

Analizar a detalle las situaciones en altura tales como: la vaguada ecuatorial, la corriente en chorro ecuatorial débil de nivel bajo del este, la corriente en chorro ecuatorial de nivel medio, la corriente en chorro de nivel bajo del norte y la oscilación de Madden y Julian (MJO), y complementar el presente estudio con este análisis, conseguiría unificar y comprender las situaciones sinópticas en superficie para el Ecuador.

En el presente trabajo se realizó la caracterización climatológica analizando sólo situaciones sinópticas en superficie y de gran extensión. Cabe mencionar el interés personal y la importancia de continuar con la investigación en este campo de la climatología sinóptica en el Ecuador.

## CONTRIBUCIONES DE AUTORES

Diseño y conceptualización: Tomàs Molina Bosch y Francisco Javier Méndez Bravo.

Adquisición de datos: Francisco Javier Méndez Bravo.



Análisis e Interpretación de datos: Tomàs Molina Bosch y Francisco Javier Méndez Bravo.  
Redacción del artículo: Francisco Javier Méndez Bravo.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores manifiestan que no hay conflicto de intereses en esta investigación y que no ha habido financiación externa para esta investigación. No existe ningún interés financiero ni no financiero que declarar. Todos los autores han leído y aprobado el manuscrito final y consienten en su publicación.



## REFERENCIAS

- [1] Alessandro, A. P. (1998). *Contribuciones al estudio de la climatología sinóptica en la Argentina* (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales) [https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/greenstone3/eva/collection/tesis/document/tesis\\_n3091\\_Alessandro](https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/greenstone3/eva/collection/tesis/document/tesis_n3091_Alessandro)
- [2] Martín Vide, J., & Olcina, J. (2001). *Climas y tiempos de España*. Madrid: Alianza Editorial.
- [3] Hewitson, B., & Crane, R. (2002). Self-organizing maps: Applications to synoptic climatology. *Climate Research*, 22(1), 13–26. <https://www.int-res.com/abstracts/cr/v22/n1/p13-26/>
- [4] Tullot, I. F. (2000). *Climatología de España y Portugal*. Universidad de Salamanca.
- [5] Albertosa, L. (1976). Climatología dinámica, sinóptica o sintética. Origen y desarrollo. *Revista de Geografía*, 10(1-2), 10-15. <https://www.raco.cat/index.php/RevistaGeografia/article/download/45713/56702>
- [6] Martín Vide, J. (2005). *Los mapas del tiempo*. Davinci Continental.
- [7] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2014). *Lo que debemos saber sobre meteorología*. INAMHI. <https://es.scribd.com/document/422431595/Lo-Que-Debemos-Saber-Sobre-Meteorologia-INAMHI-2014>
- [8] Satyamurty, P., & Rosa, M. (2019). Synoptic climatology of tropical and subtropical South America and adjoining seas as inferred from Geostationary Operational Environmental Satellite imagery. *International Journal of Climatology*, 40(1), 378–399. <https://doi.org/10.1002/joc.6217>
- [9] Waliser, D. E., & Gautier, C. (1993). A satellite-derived climatology of the ITCZ. *Journal of climate*, 6(11), 2162-2174. <https://www.jstor.org/stable/26198602>
- [10] Wang, C. C., & Magnusdottir, G. (2006). The ITCZ in the central and eastern Pacific on synoptic time scales. *Monthly Weather Review*, 134(5), 1405-1421. <https://doi.org/10.1175/MWR3130.1>
- [11] Rahn, D. A., & Garreaud, R. D. (2014). A synoptic climatology of the near-surface wind along the west coast of South America. *International Journal of Climatology*, 34(3). <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.3724>
- [12] Halpern, D. (2002). *An atlas of monthly mean distributions of SSM/I wind speed, AVHRR sea surface temperature, TMI sea surface temperature, QuikSCAT ocean vector wind, SeaWiFS Chlorophyll-a, and TOPEX/POSEIDON sea surface topography during 2001* (Vol. 2). National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19950004463/downloads/19950004463.pdf>
- [13] Rodwell, M. J., & Hoskins, B. J. (2001). Subtropical anticyclones and summer monsoons. *Journal of Climate*, 14(15), 3192-3211. [https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/14/15/1520-0442\\_2001\\_014\\_3192\\_saaasm\\_2.0.co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/14/15/1520-0442_2001_014_3192_saaasm_2.0.co_2.xml)
- [14] American Meteorological Society. (10 October 2022). *Equatorial easterlies*. Glossary of Meteorology. [https://glossary.ametsoc.org/wiki/Equatorial\\_easterlies](https://glossary.ametsoc.org/wiki/Equatorial_easterlies).
- [15] Emck, P. (2007). *A climatology of south Ecuador—with special focus on the major Andean ridge as Atlantic-Pacific climate divide* (Doctoral dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg).
- [16] Andreoli, R. V., de Oliveira, S. S., Kayano, M. T., Viegas, J., de Souza, R. A. F., & Candido, L. A. (2017). The influence of different El Niño types on the South American rainfall. *International Journal of Climatology*, 37(3).
- [17] Larkin, N. K., & Harrison, D. E. (2002). ENSO warm (El Niño) and cold (La Niña) event life cycles: Ocean surface anomaly patterns, their symmetries, asymmetries, and implications. *Journal of climate*, 15(10). [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<1118:EWENOA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1118:EWENOA>2.0.CO;2)
- [18] Corporación Andina de Fomento. (2000). *El Fenómeno El Niño 1997-1998. Memoria, retos y soluciones* (Vol. 4). Equipo de Dirección y Coordinación Técnica CAF.
- [19] Instituto Geográfico Militar. (2010). *Cartas topográficas del Ecuador (ríos, vías y poblados)*: Escala 1:50 000. IGM.
- [20] Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca. (2016). *Modelo Digital de Terreno del Ecuador Resolución Espacial 50 metros*. MAGAP.
- [21] Instituto Geográfico Militar. (2013). *Atlas geográfico de la república del Ecuador*. IGM.
- [22] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2008). *Promedios anuales de precipitación para el Ecuador. Escala 1: 1.000.000*. INAMHI.



- [23] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2015). *Anuario Meteorológico N° 52-2012*. INAMHI. <https://es.slideshare.net/slideshow/am-2012/77446693>
- [24] Nuñez Cobo, J., & Verbist, K. (2018). *Atlas de sequías de América Latina y el Caribe*. UNESCO Publishing.
- [25] Secretaría de Gestión de Riesgos del Ecuador. (2018). *Plan nacional de respuesta ante desastres*. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/08/Plan-Nacional-de-Respuesta-SGR-RespondeEC.pdf>
- [26] Woodruff, S., Worley, S., Lubker, S., Ji, Z., Freeman, J., Berry, D., Brohan, P., Kent, E., Reynolds, R., Smith, S., & Wilkinson, C. (2011). ICOADS Release 2.5; extensions and enhancements to the surface marine meteorological archive. *International Journal of Climatology*, 31. <https://digitalcommons.unl.edu/usdeptcommercepub/332/>
- [27] Saha, S., Moorthi S., Pan, H., Wu, X., Wang, J., S, Nadiga., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y., Chuang, H., H. Juang, H., Sela, J... Goldberg, M. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015-1058. [https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/91/8/2010bams3001\\_1.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/91/8/2010bams3001_1.xml)
- [28] Whelpdale, D. M., Low, T. B., & Kolomeychuk, R. J. (1984). Advection climatology for the east coast of North America. *Atmospheric Environment* (1967), 18(7). [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(84\)90040-4](https://doi.org/10.1016/0004-6981(84)90040-4)
- [29] Alfaro, E. J. (2014). Caracterización del “veranillo” en dos cuencas de la vertiente del Pacífico de Costa Rica, América Central. *Revista de Biología Tropical*, 62(4), 1-15. <https://www.redalyc.org/pdf/449/44958812002.pdf>
- [30] Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., ... & Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3) [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
- [31] Torres, E. S., Estela, L. B. L., Suárez, L. M. S., & Naranjo, Y. V. (2020) *Catálogo de los tipos de situaciones sinópticas que influyen sobre Cuba*. Centro Meteorológico de la Isla de la Juventud, INSMET.
- [32] Torres, E. S., Suárez, L. M. S., Naranjo, Y. V., & Estela, L. B. L. (2022). Caracterización sinóptico-climatológica de la rapidez media del viento en la costa norte de la mitad oriental de Cuba. *Revista cubana de meteorología*, 28(4). <https://www.redalyc.org/journal/7019/701977562003/701977562003.pdf>
- [33] Paredes Orihuela, D. E. (2023). *Olas de calor en la región norte del Perú y su correlación con eventos ENSO (1979-2018)*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ciencias, Departamento Académico de Ingeniería Ambiental, Física y Meteorología <https://hdl.handle.net/20.500.12996/5601>.
- [34] Ogassawara, J. F., Nunes, A. B., & Riquetti, N. B. (2021). Eventos extremos de precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Piratini: relação com Enos e estudo de caso. *Revista Brasileira de Climatologia*, 28, 342-364. <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/artide/view/14570>

## Hacia una agricultura resiliente al cambio climático: sistemas de riego inteligente y monitoreo de humedad del suelo para cultivos en la zona andina

Juan Sebastián Rhor<sup>1\*</sup>, Dennis Cazar-Ramirez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad San Francisco de Quito USFQ, Colegio de Ciencias e Ingenierías, Departamento de Electrónica, Quito, Ecuador.

<sup>2</sup>Universidad San Francisco de Quito USFQ, Colegio de Ciencias e Ingenierías, Laboratorio de Detección de Partículas, Astropartículas y Radiaciones LEOPARD, Quito, Ecuador.

\*Autor para Correspondencia / Corresponding Author, e-mail: [jrhor@estud.usfq.edu.ec](mailto:jrhor@estud.usfq.edu.ec)

## Toward climate-resilient agriculture: smart irrigation systems and soil moisture monitoring for crops in the Andean Region

---

### Resumen

El cambio climático y el calentamiento global plantean desafíos significativos para la agricultura, especialmente en un mundo cada vez más interconectado y dependiente de productos básicos. El presente trabajo analiza las implicaciones del cambio climático en la agricultura, centrándose en la zona andina de América Latina, con un énfasis particular en Ecuador. Se discuten los efectos del cambio climático en la producción agrícola, la disponibilidad de recursos hídricos y las posibles soluciones tecnológicas. Se examinan investigaciones que demuestran tanto los efectos positivos como negativos del cambio climático en la agricultura, y se resalta la importancia de encontrar soluciones tecnológicas para mitigar estos impactos. Se enfatiza la necesidad de mejorar la productividad agrícola y la eficiencia en el uso del agua, especialmente en regiones vulnerables al cambio climático como son los andes ecuatorianos. Este trabajo propone el desarrollo de sistemas de riego inteligente basados en tecnologías innovadoras, como la detección de neutrones cósmicos, para monitorear la humedad del suelo de manera precisa y en tiempo real. Se destaca la importancia de implementar estas tecnologías en la región para mejorar la productividad agrícola, prevenir crisis alimentarias y adaptarse al cambio climático. Se concluye resaltando la necesidad de colaboración entre instituciones de investigación y formuladores de políticas para abordar estos desafíos de manera efectiva y sostenible.

**Palabras clave:** cambio climático, calentamiento global, recursos hídricos, agricultura de precisión, estimación de la humedad del suelo, detección de neutrones cósmicos.

### Abstract

Climate change and global warming pose significant challenges for agriculture, especially in an increasingly interconnected world reliant on basic commodities. This paper examines the implications of climate change on agriculture, focusing on the Andean region of Latin America, with particular emphasis on Ecuador. The effects of climate change on agricultural production, water resource availability, and potential technological solutions are discussed. Research demonstrating both the positive and negative effects of climate change on agriculture is examined, underscoring the



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Edgar Carrera Jarrín

Recibido /  
Received:  
26/08/2024

Aceptado /  
Accepted:  
23/01/2025

Publicado en línea /  
Published online:  
14/05/2025



importance of finding technological solutions to mitigate these impacts. The need to improve agricultural productivity and water use efficiency, particularly in climate change-vulnerable regions such as the Ecuadorian Andes, is emphasized. This paper proposes the development of intelligent irrigation systems based on innovative technologies, such as cosmic neutron detection, to precisely and in real-time monitor soil moisture. The importance of implementing these technologies in the region to enhance agricultural productivity, prevent food crises, and adapt to climate change is highlighted. The conclusion emphasizes the necessity of collaboration between research institutions and policymakers to effectively and sustainably address these challenges.

**Keywords:** climate change, global warming, water resources, precision Agriculture, soil moisture estimation, cosmic ray neutron detection

---

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático como consecuencia del calentamiento global es un aspecto crítico. Su impacto es tal que influye dentro de una sociedad cada vez más interconectada, globalizada y sobre todo dependiente en lo que se refiere a productos básicos para nuestra supervivencia, como son la producción de energía y de alimentos. En lo que se refiere a la producción de alimentos, la prevalencia y bienestar de los agricultores resultan temas de preocupación tanto para la comunidad científica como para los ambientes sociopolíticos, al referirse a una de nuestras fuentes de alimentos principales a nivel mundial.

De esta manera, el enfoque de este trabajo nace a partir de una exploración que busca, en principio y de manera general, determinar la magnitud de los riesgos y amenazas que representan las consecuencias del cambio climático en la agricultura y analizar cómo la ciencia y la tecnología pueden ayudar a mitigar sus consecuencias.

De acuerdo con una publicación en el *European Journal of Agronomy*, dedicada al análisis de las posibles consecuencias del cambio climático dentro de las zonas agrícolas en Europa [1], se afirma que existirán efectos tanto positivos como negativos dependiendo de la zona. En el norte del continente se espera un incremento en las zonas aptas para la actividad agrícola y en el número de especies emergentes para el cultivo, pero se teme que la precipitación extrema y las características del suelo conduzcan a una mayor fragilidad de la cosecha al momento del crecimiento. Por el contrario, se pronostica que las zonas del sur experimentarán una pérdida de zonas aptas para el cultivo debido a la escasez de agua y a los eventos de climas extremos.

De esta manera se puede concluir que, aunque los efectos del cambio climático dentro de las zonas agrícolas no sean desalentadores de manera unánime, se debe considerar el riesgo de una pérdida creciente de zonas de cultivo, cuyo impacto sobre la cadena de suministro de alimentos será capaz de provocar crisis económicas y sociales que afecten a la población.

Gracias a la creación de un modelo econométrico específico para determinar la influencia del cambio climático de origen antropogénico en la productividad agrícola [2] se determinó que este fenómeno ha provocado una reducción en la producción agrícola



de un 21 % a nivel global desde 1 961 y entre un 26 % a un 34 % en regiones más cálidas como lo son gran parte de África, América Latina y el Caribe.

A partir de este análisis se puede determinar la severidad del impacto del cambio climático dentro del medio y de la capacidad de este fenómeno de convertirse en una amenaza para el *status quo* de nuestra sociedad. Además, resulta una gran preocupación que la región andina y el Ecuador en particular, se encuentren en primera línea con respecto a la necesidad de métodos y soluciones que logren mitigar los efectos del cambio climático para preservar las zonas agrícolas en actividad.

Esta situación se vuelve más urgente al considerar que, de acuerdo con el *Regional Strategic Profile for Latin America and the Caribbean* (RSP) 2016-2021 [3], hacia el año 2050, América Latina representará aproximadamente el 60 % de la demanda mundial de alimentos. El Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura señala que la productividad agrícola debe aumentar en un 1.75 % anual para satisfacer las necesidades alimentarias proyectadas para el mundo en 2050.

## USO DE RECURSOS HÍDRICOS

El contexto actual desfavorece con gravedad a las actividades agrícolas en el continente. A la vez que se exige una mejora de productividad para satisfacer las proyecciones del aumento poblacional, los efectos del cambio climático incrementan la brecha entre los resultados de abastecimiento esperados y la capacidad actual de las zonas destinadas a la producción de alimentos. A raíz de esto, resulta imperativo encontrar alternativas o métodos que generen un incremento importante de la productividad agrícola. Dentro de todas las posibilidades a valorar, se ha identificado el manejo y optimización de los recursos hídricos como la estrategia más beneficiosa para el contexto regional.

De acuerdo con una investigación publicada en la revista *Environmental and Experimental Botany* [4], los países en vías de desarrollo presentan dificultades para cubrir los gastos de investigaciones complejas que puedan mejorar la productividad agrícola, tales como las dedicadas al estrés por sequía. De esta manera, consideraron que la mejor alternativa para incrementar la producción o mejorar su calidad a un bajo costo sería a partir de un mejor manejo de los recursos de abastecimiento de agua. Para algunas regiones, se sostiene que el enfoque más directo implica renunciar a depender exclusivamente de las fuentes de lluvia para la irrigación y, en su lugar, adoptar otro tipo de sistemas de riego.

Partiendo de esta investigación, la atención se centró en los sistemas de irrigación como un método prometedor para la optimización de los recursos hídricos. Existen varias publicaciones que comparten esta visión y han obtenido resultados alentadores al realizar contrastes con otros métodos de irrigación más tradicionales. Una de ellas se publicó en la revista de *Hydrology and Earth System Sciences* [5], donde los autores comparan diversas técnicas de riego (surcos, aspersión, goteo y goteo subsuperficial) y concluyen que los métodos de goteo y riego subsuperficial presentan las mayores reducciones en el consumo de agua al enfocarse en la zona radicular y minimizar la evaporación superficial. Más allá, una publicación realizada por la *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo* [6] compara los métodos de riego por gravedad, goteo y aspersión para el cultivo de maíz, con la conclusión de que "el tratamiento con mayor



eficiencia de aplicación fue el riego por goteo (T2) con 96 %; esta eficiencia influyó significativamente en el rendimiento por categoría del cultivo de maíz”.

Para continuar con la investigación inicial, los autores concluyeron que la prevalencia de la lluvia como fuente principal de irrigación es justificable cuando resulta ser el único método disponible para asegurar la supervivencia de la cosecha. Con la irrigación por lluvia se sacrifica el crecimiento máximo del cultivo, lo cual se podría lograr a partir de un manejo óptimo del suministro de agua con un sistema de irrigación inteligente. También reiteran que la producción óptima de alimentos obtenida gracias a este método ayuda a prevenir una mayor extensión de la frontera agrícola, debido a que se lograría responder a los incrementos de demanda como producto del aumento poblacional. Esta es una de las características mejor valoradas dentro del plan de optimización, pues la permanencia de los espacios naturales es de vital importancia para contraatacar al calentamiento global, lo que a su vez lograría proteger a las zonas agrícolas establecidas de mayores riesgos ambientales.

En esta línea, otra investigación publicada en el *Journal Frontiers* [7] reporta que la adopción de sistemas de micro-irrigación es útil tanto para reducir la evaporación del agua del suelo entre las filas de plantas de la cosecha, como para limitar la evaporación alrededor del dosel de las plantas casi en su totalidad. A partir de ello validaron estos sistemas como métodos para mejorar la Eficiencia del Uso del Agua (WUE). La obtención de una mejora en el WUE resulta sumamente importante, dado que este parámetro tiene una estrecha relación con respecto a productividad y calidad de los cultivos.

Por otra parte, y a pesar de los buenos resultados reportados, la realidad global es que el desarrollo de los sistemas de irrigación no ha alcanzado su punto óptimo. A partir de una exploración más extensa realizada por la UNESCO [8] se encontró que, de acuerdo con el reporte de las Naciones Unidas sobre el programa del desarrollo del agua, aproximadamente el 69 % del suministro mundial de agua dulce se destina a la agricultura, particularmente a la irrigación, con menos del 50 % de eficiencia en su utilización. Se reporta también que el 20 % de la tierra dedicada a la agricultura alrededor del mundo es suministrada de agua a partir de sistemas de irrigación, y a pesar de ello produce alrededor del 40 % de los alimentos [8].

A partir de estas cifras se puede notar que existe un enorme margen de mejora en lo que se refiere al manejo y distribución del agua para los sistemas de irrigación dentro de las zonas agrícolas y la producción neta de alimentos. De esta manera, la investigación en la optimización del uso del agua a partir de sistemas de irrigación más sofisticados no es solamente una forma de mejorar la producción agrícola sino una estrategia para lograr un uso responsable de este recurso y permitir una mejor distribución que beneficie tanto a las áreas dedicadas a la agricultura como a diferentes sectores de nuestra sociedad.

## ENFOQUE DE LA REVISIÓN

### El contexto hídrico de las zonas agrícolas ecuatorianas

La realidad de la agricultura ecuatoriana está muy alejada de cumplir con las necesidades actuales que se exhiben dentro del manejo de sus recursos hídricos para abastecer los



terrenos agrícolas del país. De acuerdo con una investigación realizada a nivel nacional entre el 2017 y 2018, se estimó que “el 21,1 % de la superficie cultivada del Ecuador se regó” [9]. Este contexto está afectando severamente a varios productos fundamentales para la economía de exportación y abastecimiento del país. Dentro de los más preocupantes, se observa que para el 2018, alrededor del 77.5 % de la tierra dedicada al cacao, el 28.7 % para el arroz y el 62.3 % para la papa no fueron regadas [9].

Más allá, las técnicas de riego utilizadas por los grandes y pequeños agricultores presentan un atraso considerable en términos de tecnología y optimización, de manera que los métodos tradicionales siguen siendo vigentes a pesar de sus claras desventajas. Se observa que para el 2018, solo el 39.7 % de la tierra bajo riego estuvo mantenida por un sistema de aspersión para cultivos permanentes, siendo reducido a un 13.6 % para zonas de cultivos transitorios.

En contraste, el método de surcos-inundación sigue siendo ampliamente utilizado en el país para regar el 32.6 % de la tierra dedicada a cultivos permanentes y hasta el 79.7 % para cultivos transitorios [9]. En otra investigación realizada por el Banco Mundial en 2021, se encontró que en Ecuador, “de las 338 mil hectáreas en manos de los pequeños y medianos productores que cuentan con riego, el 93 % aún utilizan métodos de irrigación tradicionales, con niveles de eficiencia reducida y una limitada capacidad de almacenamiento de agua” [10].

A raíz de esta situación, se ha buscado alternativas que puedan favorecer la producción agrícola, optimizando los recursos disponibles y limitando los costos de aplicación. Existen algunos proyectos, llevados a cabo en su mayoría con el apoyo de organizaciones gubernamentales y sin fines de lucro, donde los resultados han sido prometedores.

Uno de ellos es el Proyecto De Irrigación Tecnificada Para Pequeños y Medianos Productores y Productoras, implementado por el Ministerio de Agricultura y con financiamiento del Banco Mundial y la Agencia Española de Cooperación para el Desarrollo (AECID) [8]. Con el objetivo de ayudar a los pequeños y grandes agricultores, se obtuvo que los campesinos incluidos en el programa lograron no solamente un incremento dentro de sus ingresos (que se reportó alrededor del 60 %), sino un aumento de productividad de la tierra y una minimización del impacto de las condiciones climáticas dentro de la integridad y capacidad de las cosechas en ciertas épocas del año.

No obstante, el proceso de renovación y adaptación de las zonas agrícolas en el país hacia métodos de riego más eficientes aún tiene un gran camino por recorrer. De esta manera, se encuentra una gran oportunidad de investigación y desarrollo de tecnología para nuestra realidad geográfica, climática y social con el fin de mejorar la calidad, capacidad de producción y permanencia de nuestras fuentes de alimentos en un contexto de desabastecimiento, calentamiento global y un constante aumento de necesidades alimenticias tanto local como globalmente.

## Sistemas de riego inteligentes

Un sistema de riego inteligente es una solución tecnológica integral que automatiza y optimiza el riego agrícola mediante el uso de sensores para monitorear las condiciones



del suelo y el clima, actuadores para gestionar diferentes métodos de riego, y algoritmos avanzados de machine learning e inteligencia artificial para el procesamiento y análisis de datos. Este sistema busca maximizar la eficiencia del uso del agua, mejorar el rendimiento de los cultivos y reducir el desperdicio, adaptándose dinámicamente a las necesidades específicas del cultivo y las condiciones ambientales cambiantes.

Un sistema de riego inteligente está compuesto por 3 sistemas principales. El primero se basa en la medición de variables ambientales (temperatura, presión atmosférica, irradiancia solar, entre otras) y parámetros específicos del suelo (humedad, porosidad, densidad, entre otros). El segundo es una unidad de procesamiento de datos capaz de determinar el modo óptimo de irrigar los cultivos determinando la cantidad de agua, la profundidad y la cadencia del riego. El tercero se encarga de la irrigación de suelo programado en tiempo real usando sistemas de aspersión, goteo u otros disponibles.

En este artículo nos centraremos en los sistemas de medición de humedad del suelo, en particular el uso de nuevas tecnologías basadas en la determinación de la humedad del suelo mediante la detección de neutrones cósmicos.

En la actualidad, los métodos de determinación del nivel de humedad del suelo y la atmósfera para grandes extensiones de terreno se pueden clasificar en dos grupos:

**Técnicas basadas en el escaneo satelital:** el uso de imágenes satelitales para estimar la humedad del suelo fue el primer candidato para generar un mapa global de humedad en el planeta, siendo un ejemplo el Soil Moisture Active Passive SMAP de la NASA [11]. Se están desarrollando técnicas basadas en el análisis hiperspectral de imágenes satelitales para determinar el tipo de suelo e inferir su nivel de humedad [12]. El aspecto positivo de esta técnica es la disponibilidad de imágenes satelitales de grandes extensiones en el tiempo; no obstante, su escasa resolución horizontal, poca resolución en profundidad y alto costo no la hacen una técnica utilizable en nuestra región, especialmente para agricultores que manejan pequeñas áreas de cultivo. Además, esta iniciativa no está especializada en agricultura, dado que la escala de la recopilación de información no se puede adecuar para mediciones en áreas específicas de cultivos (menos de una hectárea) donde, para la aplicación de interés, se necesita contar con un monitoreo constante de la humedad del terreno.

**Redes de sensores de humedad:** el segundo grupo engloba a las redes de sensores de humedad. Aunque existen diversos tipos de acuerdo con el presupuesto y capacidad esperada de la red, nuestro enfoque apunta a las que están compuestas por sensores de alta resolución espacial, tales como las iniciativas de COSMOS-US y COSMO-UK [13], las cuales determinan la abundancia de los neutrones térmicos utilizando detectores gaseosos (como los de Helio-3), para retornar mediciones de gran precisión. No obstante, estas redes son costosas y difíciles de implementar, ya que los gases utilizados son derivados de la producción de energía nuclear.

Además, la escala de estas redes no suele considerar a regiones en vías de desarrollo. Un ejemplo se encuentra en la siguiente figura, la cual muestra la localización de sensores de la red COSMOS. Nótese que tanto en Centroamérica y Sudamérica (a excepción de Brasil), como en gran parte de África, no existen sensores instalados (Figura 1).



**TABLA 1.** Elenco de los detectores CRND de la red COSMOS en el mundo detallados por país, incluyendo la cobertura y su estado de funcionamiento.

País	Nro. De detectores (aproximado)	Estado	Alcance (m de radio)
EE.UU.	500	Activo	240
Reino Unido	50	Activo	200
Alemania	20	Activo	250
China	10	Parcial	200
Vietnam	3	Prueba (Plan piloto)	150 – 180
Italia	3 - 5	Experimental	200
Francia	5	Activo	240
España	3 - 4	Prueba	200
Dinamarca	2 - 3	Activo	200
Brasil	2	Prueba	N.D.

Un contraste de ambas alternativas nos permitió reconocer sus ventajas y desventajas individuales. Gracias a ello logramos justificar a la red de sensores como la alternativa que mejor podría ajustarse para la implementación de un sistema de riego de monitoreo en la región (Tabla 2).

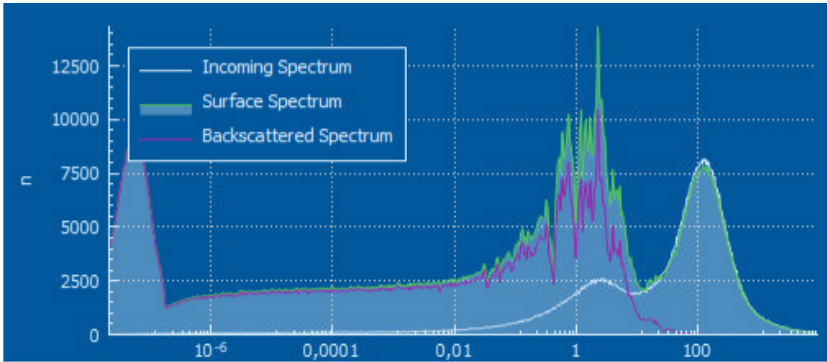
**TABLA 2.** Comparación de los principales aspectos de los sistemas de detección del nivel de humedad en el suelo.

Características	Escaneo satelital	Redes de sensores
Resolución	Baja	Alta
Cobertura	Alta (km)	Moderada (hm)
Acceso a datos crudos	NO	NO
Datos de la región	Parciales	Nulos
Costos	Alto (MUSD)	Moderado (KUSD)

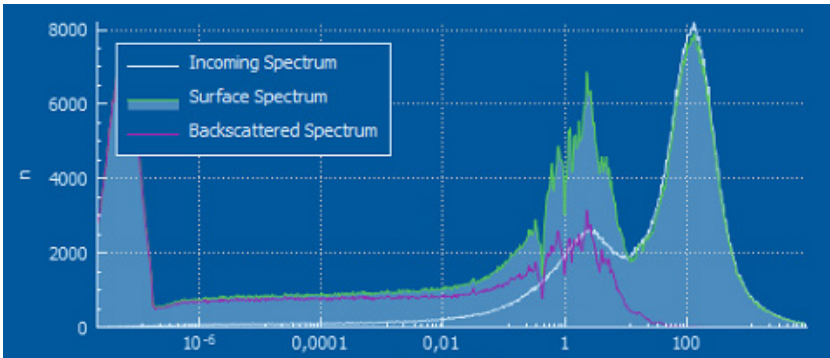
## El detector de rayos cósmicos y su abanico de posibilidades.

El uso de técnicas derivadas de la Física Nuclear y la Física de Altas Energías, como son la Detección de Neutrones provenientes de Rayos Cósmicos (CRND), pueden brindar una solución eficiente y económica para realizar un monitoreo constante y preciso del nivel de humedad de grandes extensiones de terreno.

Los neutrones provenientes de los rayos cósmicos son moderados por el hidrógeno presente en el suelo, y en los cultivos. Estos presentan una anti-correlación entre el conteo de neutrones térmicos (con energía cinética de eV~MeV) y la humedad local del suelo [14] La Figura 1 muestra la diferencia de abundancia de neutrones para dos muestras de suelo con diversos niveles de humedad.



**Figura 1 A**



**Figura 1 B**

**FIGURA 1.** Espectros de energía de neutrones cósmicos realizadas con dos niveles de humedad relativa del suelo: suelo seco 6 % (a) y suelo húmedo 40 % (b) se evidencia una diferencia del 40 % en abundancia de neutrones epitermales (energía entre 10-6 y 10-4 MeVs), simulaciones realizadas con URANUS [15].

La CRN se ha consolidado como un método de monitoreo bien establecido que proporciona el Contenido Volumétrico de Agua (VWC) medio del suelo en 1 hectárea aproximadamente. Las redes de monitoreo de humedad COSMOS-US y COSMOS-UK demuestran la efectividad de esta técnica para el monitoreo a largo plazo de las condiciones hidrológicas de grandes extensiones.

A partir de estos detectores se pueden desarrollar sistemas para optimizar los procesos de irrigación y almacenamiento de agua dentro de los cultivos. Además, la información recopilada por los detectores CRND puede servir como complemento para otras técnicas de monitoreo de humedad del suelo. En combinación con la información proporcionada por satélites, sondas y análisis químicos, es posible desarrollar sistemas para calibrar los datos extrapolados de imágenes satelitales y contrastar las medidas puntuales hechas por estaciones meteorológicas y otros tipos de sondas.

Cabe afirmar también que los detectores CRND son sensibles no solamente a la humedad del suelo, sino también a concentraciones de agua en la superficie, como puede ser nieve, concentraciones de agua y biomasa. Con un adecuado análisis de datos, estos



sistemas podrían utilizarse para mejorar modelos de predicción meteorológica, sobre todo con un enfoque de estudio de fenómenos climáticos extremos (como las sequías e inundaciones) y los ciclos de carbón y su relación con el agua. También pueden resultar útiles en el monitoreo de glaciares y cuencas hídricas.

## Tecnologías en detectores de neutrones cósmicos

Los detectores de neutrones cósmicos (CRNS) utilizados en la red COSMOS emplean tubos llenos de gas Helio-3 ( $^3\text{He}$ ) como medio de detección. Estos tubos funcionan como detectores gaseosos que operan a alto voltaje para facilitar la detección de neutrones térmicos. Cuando los neutrones cósmicos secundarios alcanzan la superficie terrestre, parte de ellos es moderada por el hidrógeno presente en el suelo, y una fracción se convierte en neutrones térmicos. Estos neutrones térmicos pueden ser capturados por los núcleos de helio-3, generando una reacción nuclear que produce partículas cargadas (protones y tritones). Estas partículas ionizan el gas, generando impulsos eléctricos que son amplificados y procesados por un sistema de adquisición de datos. El conteo de estos impulsos está inversamente correlacionado con el contenido de hidrógeno en el suelo, lo que permite inferir su humedad volumétrica.

El Helio-3 es un isótopo poco común y su disponibilidad es limitada en la Tierra. Se forma de manera natural como producto de la desintegración radiactiva de tritio, que es un isótopo del hidrógeno. El tritio se genera en reactores nucleares como subproducto de la fisión nuclear y también puede producirse artificialmente en reactores nucleares o aceleradores de partículas. Una vez que se produce el tritio, este puede desintegrarse radiactivamente para formar helio-3. Sin embargo, la cantidad de helio-3 producido de esta manera es generalmente baja en comparación con otras fuentes de helio-3, como la captura en la atmósfera solar o la extracción de gas natural. Este hecho hace que los detectores de neutrones basados en He-3 sean costosos por lo que no representan una posibilidad para monitorear la humedad de campos agrícolas.

Los detectores de neutrones basados en plásticos centelladores son dispositivos que utilizan materiales plásticos especiales, llamados centelladores, para detectar la presencia de neutrones. Estos detectores son una opción común en muchas aplicaciones debido a su sensibilidad, bajo costo y versatilidad [16].

El funcionamiento de estos detectores se basa en el principio de que cuando un neutrón interactúa con el centellador plástico, puede transferir parte de su energía al material. Esta interacción provoca la excitación de los átomos en el centellador, que luego emiten luz (centelleo) como respuesta a la energía absorbida. Esta luz emitida puede ser detectada por un tubo fotomultiplicador (PMT) o un fotomultiplicador de Silicio (SiPM), que convierten la señal de luz en una señal eléctrica que puede ser registrada y analizada.

Los detectores de neutrones basados en plásticos centelladores pueden tener diferentes formas y tamaños dependiendo de la aplicación específica. Se utilizan en una amplia gama de campos, incluyendo la investigación nuclear, la detección de material nuclear, la vigilancia de radiación en entornos nucleares, la monitorización de la radiación en la industria, la medicina nuclear, la detección de explosivos y la exploración de recursos naturales.



Una de las ventajas clave de estos detectores es su capacidad para discriminar entre neutrones y otras partículas cargadas, como los rayos gamma, lo que les permite proporcionar mediciones precisas de la radiación neutrónica en presencia de otras fuentes de radiación. Además, son dispositivos robustos y portátiles, lo que los hace adecuados para una variedad de aplicaciones en terreno.

Utilizando plásticos centelladores y SiPMs es posible construir CRNDs con un modesto presupuesto (en torno a los 4K USD), los cuales pueden llegar a tener iguales o mayores prestaciones que los CRNDs gaseosos [17, 18].

Las técnicas de detección, los sistemas de adquisición y análisis de datos de los CRNDs son similares a las utilizadas en la detección de rayos cósmicos, disciplina en la cual muchos investigadores del país y de la región tienen extensa experiencia. Para citar un ejemplo, tenemos a la colaboración LAGO (Latin American Giant Observatory), que desde hace más de una década está formando investigadores y desarrollando sistemas de detección de rayos cósmicos para el proyecto LAGO [19].

## Aplicaciones en la región

La implementación de una red de detectores de humedad del suelo representa una necesidad urgente para la región andina si se quiere enfrentar de manera efectiva los efectos del cambio climático sobre la agricultura. Tal como se evidencia en los hallazgos de este estudio, actualmente no existen redes de sensores activas en Ecuador ni en los Andes tropicales que permitan un monitoreo sistemático de la humedad del suelo y la atmósfera. Esta ausencia de infraestructura tecnológica constituye una clara oportunidad para el impulso de la investigación, el desarrollo científico y la innovación tecnológica en nuestro entorno. Se abre una puerta concreta para que Ecuador lidere iniciativas de desarrollo en ciencia aplicada a la gestión hídrica y climática. Las aplicaciones de los CRNDs en la región pueden cubrir diversas áreas estratégicas:

- **Agricultura de precisión:** Los CRNDs permiten la implementación de sistemas de riego inteligente, optimizando el uso del agua y mejorando la productividad de los cultivos sin comprometer la sostenibilidad del recurso hídrico.
- **Conservación ambiental:** Estos sensores pueden integrarse en redes de monitoreo continuo de glaciares y ecosistemas altoandinos como los páramos, que cumplen funciones críticas de regulación y almacenamiento hídrico.
- **Gestión de riesgos y seguridad:** Los CRNDs también pueden emplearse para monitorear cambios en la humedad de suelos en quebradas, lechos de ríos y acueductos, proporcionando información clave para sistemas de alerta temprana ante inundaciones, sequías y deslizamientos o aluviones.

Además, esta tecnología representa una alternativa viable desde el punto de vista financiero. La inversión necesaria para su implementación es moderada en comparación con otras tecnologías de monitoreo ambiental, y su diseño puede ser escalado localmente. Su carácter autónomo permite que estos sistemas funcionen sin depender directamente de grandes organismos internacionales o estructuras gubernamentales complejas, facilitando su adopción a nivel comunitario.



La iniciativa también ofrece beneficios a largo plazo en términos de rentabilidad del sector agropecuario y seguridad para quienes trabajan en entornos rurales. El desarrollo de prototipos locales —capaces de registrar flujos de neutrones y astropartículas en el tiempo, procesar los datos y generar estimaciones precisas de humedad sobre hectáreas de terreno— es factible gracias al conocimiento acumulado en los institutos de investigación latinoamericanos. Además, el uso de plataformas abiertas para el almacenamiento de datos crudos y procesados fomentaría la colaboración científica y el acceso libre a la información en todo el continente.

## América latina y la agricultura de precisión

El rápido aumento de la población mundial demanda una producción alimentaria adecuada en términos de cantidad y calidad, a precios accesibles y con un mínimo impacto ambiental.

En contraste con la agricultura convencional, que trata el terreno de manera uniforme y utiliza la misma cantidad de insumos en toda la superficie de cultivo, la Agricultura de Precisión (AP) se distingue por su capacidad para gestionar la variabilidad espacial y temporal del terreno y del cultivo [20]. Esto implica la aplicación diferenciada de insumos, teniendo en cuenta las características del suelo (como textura, acidez, humedad, topografía), el desarrollo de las plantas y las condiciones específicas entre las temporadas de siembra.

Este enfoque agrícola se estructura en tres fases: recopilación de datos, análisis de información e implementación de las técnicas más apropiadas. Se apoya en cinco tecnologías principales, que incluyen sistemas de posicionamiento e información geográfica (GPS y GIS), sensores remotos, maquinaria automatizada y monitores de rendimiento y aplicación.

Para que un país pueda adoptar con éxito este modelo agrícola, es necesario contar con tres condiciones fundamentales: instituciones especializadas que generen conocimiento y formen recursos humanos, sistemas eficaces de recolección de información y una gestión precisa de los recursos agronómicos mediante sistemas de toma de decisiones adecuados. Los sistemas de determinación de la humedad del suelo junto con sensores ambientales y estudios fisicoquímicos del suelo pueden ser la base para la creación de un gran sistema de información que permita desarrollar técnicas sofisticadas de cultivo, crecimiento y cosecha de productos agrícolas.

La inteligencia artificial (IA) se puede integrar de diversas formas en la agricultura de precisión para optimizar la producción agrícola. Aquí hay algunas formas en que se puede utilizar:

- 1. Análisis de datos:** la IA puede procesar grandes cantidades de datos recopilados de diversas fuentes, como imágenes satelitales, drones, sensores en el campo y datos meteorológicos. Algoritmos de IA pueden analizar estos datos para identificar patrones, tendencias y anomalías que pueden ser útiles para la toma de decisiones agrícolas.
- 2. Predicción de cosechas:** mediante el análisis histórico de datos agrícolas y condiciones ambientales, la IA puede predecir rendimientos de cosechas futuras.



Esto ayuda a los agricultores a planificar de manera más efectiva sus actividades agrícolas, desde la siembra hasta la cosecha.

3. **Gestión de cultivos:** los sistemas de IA pueden monitorear continuamente el crecimiento de los cultivos utilizando imágenes de satélite o drones. Con algoritmos de aprendizaje automático, pueden identificar áreas que requieren atención especial, como la detección de enfermedades, estrés hídrico o deficiencias nutricionales.
4. **Optimización de insumos:** la IA puede ayudar a los agricultores a optimizar el uso de insumos como agua, fertilizantes y pesticidas. Al analizar datos sobre las condiciones del suelo, el clima y el crecimiento de los cultivos, los algoritmos de IA pueden recomendar la cantidad adecuada de insumos en cada área del campo, reduciendo así el desperdicio y los costos.
5. **Sistemas de control autónomo:** la IA puede integrarse en equipos agrícolas autónomos, como tractores y rociadores, para realizar tareas específicas en el campo de manera precisa y eficiente. Estos sistemas pueden adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes del terreno y responder en tiempo real a los datos recopilados por sensores.

## CONCLUSIONES

Las estrategias y métodos de riego utilizados por los agricultores de Ecuador se basan en técnicas tradicionales que son ineficientes e inadecuadas desde el punto de vista de la optimización de recursos hídricos. Esto constituye un factor negativo a nivel productivo porque no se logra maximizar la producción agrícola del suelo.

La introducción de tecnología en actividades agrícolas, en especial el desarrollo de redes de sensores para la medida y monitoreo constante del nivel de humedad relativa del suelo, servirá para el desarrollo de sistemas de riego inteligente que puedan procesar datos en tiempo real y determinar la cantidad óptima de agua para irrigación.

El avance de la investigación y tecnología en la detección de partículas se hace asequible desde el punto de vista de conocimiento y de inversión para la implementación de una red regional de monitoreo de la humedad del suelo. El monitoreo de la humedad del suelo puede ser usado para el desarrollo de técnicas de optimización del uso del agua de riego y otros recursos (agronomía de precisión) que permitan el ahorro de recursos y el aumento de la producción, el estudio de ciclos de biomasa para combatir el cambio climático (determinación del cambio en el nivel de biomasa del terreno) y el aumento en la exactitud de las previsiones meteorológicas, en especial en la predicción de sequías o inundaciones.

La implementación de técnicas de AP en nuestra región debe iniciar por la creación y desarrollo de una red de sensores ambientales y de caracterización del suelo que generen información consistente en el tiempo y en el espacio. Esta información debe ser pública para que diversos grupos de investigación los puedan analizar.



La IA ofrece una variedad de herramientas y técnicas que pueden mejorar la agricultura de precisión al proporcionar análisis avanzados, predicciones precisas y decisiones automatizadas basadas en datos en tiempo real. Esto permite a los agricultores optimizar la producción, reducir costos y minimizar el impacto ambiental.

Todo esfuerzo que se encamine a la integración de nuestra región a través del desarrollo de proyectos conjuntos encaminados a resolver problemas comunes debe ser tomado en consideración y apoyado por las instituciones que se encargan de la toma de decisiones y la implementación de políticas de estado.

## **CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES**

Los autores contribuyeron en todas las etapas de elaboración del presente artículo.

## **CONFLICTO DE INTERÉS**

Los autores declaran no tener conflictos de interés relacionados con los contenidos de esta investigación.

## REFERENCIAS

- [1] Zhao, J., Bindi, M., Eitzinger, J., Ferrise, R., Gaile, Z., Gobin, A., Holzkämper, A., Kersebaum, K.-C., Kozyra, J., Kriaučiūnienė, Z., Loit, E., Nejedlik, P., Nendel, C., Niinemets, Ü., Palosuo, T., Peltonen-Sainio, P., Potopová, V., Ruiz-Ramos, M., Reidsma, P., Rijk, B., Trnka, M., van Ittersum, M. K., & Olesen, J. E. (2022). Priority for climate adaptation measures in European crop production systems. *European Journal of Agronomy*, *138*, 126516. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126516>.
- [2] Ortiz-Bobea, A., Ault, T. R., Carrillo, C. M., Chambers, R. G., & Lobell, D. B. (2021). Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. *Nature Climate Change*, *11*(4), 306–312. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1>
- [3] International Atomic Energy Agency. (2015). *ARCAL - Regional Strategic Profile for Latin America and the Caribbean (RSP) 2016–2021* (IAEA-TECDOC–1763(S)). International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/>
- [4] Sharp, R. E., & Davies, W. J. (1985). Root growth and water uptake by maize plants in drying soil. *Journal of Experimental Botany*, *36*(9), 1441–1456. <https://doi.org/10.1093/jxb/36.9.1441>
- [5] Chukalla, A. D., Krol, M. S., & Hoekstra, A. Y. (2015). Green and blue water footprint reduction in irrigated agriculture: Effect of irrigation techniques, irrigation strategies, and mulching. *Hydrology and Earth System Sciences*, *19*(12), 4877–4891. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4877-2015>
- [6] Lema Mancero, C. R. (2022). *Eficiencia de aplicación de tres métodos de riego en el cultivo de maíz (Zea mays L.) variedad INIAP-101* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/16550>
- [7] Gago, J., Douthe, C., Florez-Sarasa, I., Escalona, J. M., Galmés, J., Fernie, A. R., Flexas, J., & Medrano, H. (2014). Opportunities for improving leaf water use efficiency under climate change conditions. *Plant Science*, *226*, 108–119. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.04.007>
- [8] UNESCO. (2021). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2021: El valor del agua; datos y cifras* (SC-2021/WS/3). WWAP. [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751\\_spa](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751_spa)
- [9] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2020). *Información agroambiental y tecnificación agropecuaria, módulo ESPAC 2018*. [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas\\_Ambientales/Modulo\\_Ambiental\\_ESPAC\\_2018/RESULT\\_MOD\\_AMB\\_ESPAC\\_2018.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Modulo_Ambiental_ESPAC_2018/RESULT_MOD_AMB_ESPAC_2018.pdf)
- [10] Banco Mundial. (14 de julio de 2021). En Ecuador, el riego tecnificado equivale a cultivos más sostenibles y mejor alimentación. *World Bank*. <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2021/07/14/en-ecuador-el-riego-tecnificado-equivale-a-cultivos-m-s-sostenibles-y-mejor-alimentaci-n>
- [11] Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Wigneron, J. P., Delwart, S., Cabot, F., Boutin, J., Escorihuela, M. J., Font, J., Reul, N., Gruhier, C., Juglea, S. E., Drinkwater, M. R., Hahne, A., Martín-Neira, M., & Mecklenburg, S. (2010). The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle. *Proceedings of the IEEE*, *98*(5), 666–687. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043032>
- [12] Singh, A., & Gaurav, K. (2023). Deep learning and data fusion to estimate surface soil moisture from multi-sensor satellite images. *Scientific Reports*, *13*(1), 2251. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28939-9>
- [13] Wallbank, J. R., Cole, S. J., Moore, R. J., Anderson, S. R., & Mellor, E. J. (2021). Estimating snow water equivalent using cosmic-ray neutron sensors from the COSMOS-UK network. *Hydrological Processes*, *35*(5), e14048. <https://doi.org/10.1002/hyp.14048>
- [14] Andreasen, M., Jensen, K. H., Desilets, D., Franz, T. E., Zreda, M., Boga, H. R., & Looms, M. C. (2017). Status and perspectives on the cosmic-ray neutron method for soil moisture estimation and other environmental science applications. *Vadose Zone Journal*, *16*(8). <https://doi.org/10.2136/vzj2017.04.0086>
- [15] Köhli, M., Schrön, M., Zacharias, S., & Schmidt, U. (2023). URANOS v1.0 – the Ultra Rapid Adaptable Neutron-Only Simulation for Environmental Research. *Geoscientific Model Development*, *16*(2), 449–477. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-449-2023>
- [16] Stoykov, A., Mosset, J. B., Greuter, U., Hildebrandt, M., & Schlumpf, N. (2015). A SiPM-based ZnS:6LiF scintillation neutron detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, *787*, 361–366. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.01.076>



- [17] Bodini, I., Paderno, D., Pagano, D., Donzella, A., Bonomi, G., Zenoni, A., & Villa, V. (2022). Design Requirements Assessment in the COMMAND (Compact Multi-purpose Muon and Neutron Detector) Project. En S. Gerbino, A. Lanzotti, M. Martorelli, R. Mirálbes Buil, C. Rizzi, & L. Roucoules (Eds.), *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing IV* (pp. 367–379). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-15928-2\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-031-15928-2_32)
- [18] Stevanato, L., Baroni, G., Cohen, Y., Fontana, C. L., Gatto, S., Lunardon, M., Marinello, F., Moretto, S., & Morselli, L. (2019). A novel cosmic-ray neutron sensor for soil moisture estimation over large areas. *Agriculture*, 9(9), 202. <https://doi.org/10.3390/agriculture9090202>
- [19] Asorey, H., Núñez, L. A., Suárez-Durán, M., Torres-Niño, L. A., Rodríguez-Pascual, M., Rubio-Montero, A. J., & Mayo-García, R. (2016). *The Latin American Giant Observatory: A successful collaboration in Latin America based on cosmic rays and computer science domains*. In *2016 IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid)* (pp. 707–713). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CCGrid.2016.110>
- [20] Santillán, O. (2018). *Agricultura de precisión* (p. 15). Oficina de Información Científica y Tecnológica para el Congreso de la Unión (INCYTU). [https://www.foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU\\_18-015.pdf](https://www.foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU_18-015.pdf)

## **Análisis de las condiciones del transporte intracantonal combinado de la terminal Río Coca de Quito hasta las parroquias rurales que pertenecen a la Administración Zonal Tumbaco: Revisión bibliográfica**

**Alisson Dayana Álvarez Fueres<sup>1\*</sup>**, **Gabriela Solange Muñoz Abad<sup>1</sup>**, **Fausto Alejandro Rodríguez Bravo<sup>1</sup>**, **Mónica Susana Delgado Yáñez<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Quito, Ecuador

\*Autor para Correspondencia / Corresponding Author, e-mail: [adalvarezf1@uce.edu.ec](mailto:adalvarezf1@uce.edu.ec)

## **Analysis of the conditions of combined intracantonal transportation from the Río Coca terminal in Quito to the rural parishes that belong to the Tumbaco Zonal Administration: Bibliographic review**

### **Resumen**

Este estudio examina el sistema de transporte intracantonal que conecta la terminal Río Coca, en Quito, con las parroquias rurales de la ADMINISTRACIÓN ZONAL TUMBACO, evaluando los factores que afectan la movilidad de los usuarios en desplazamientos de larga distancia desde el hipercentro urbano de Quito hacia zonas rurales. Se consideran las dinámicas de urbanización reflejadas en las tasas de crecimiento poblacional de estas áreas.

Para ello, se realizó una revisión de literatura publicada entre 1990 y 2023, utilizando las bases de datos Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect. La búsqueda de información se llevó a cabo en inglés, español y francés, utilizando palabras clave indexadas en el Tesoro de la UNESCO.

El análisis emplea herramientas cuantitativas como Posit Cloud, Tree of Science (ToS), Bibliometrix y VOSviewer, y aplica como criterio de inclusión las tasas de crecimiento poblacional en el período 1990-2001. Se identificaron tasas de crecimiento significativas en parroquias como Pifo (5.92 %), Puembo (5.25 %), Yaruquí (5.49 %), Checa (5.89 %) y El Quinche (5.93 %). En el período 2001-2010, Cumbayá también mostró un aumento poblacional notable (4.45%). Además, se consideraron factores como la actividad económica de los usuarios, mientras que se excluyeron variables como nivel educativo, idioma y etnia. A partir de este análisis, se desarrolló un modelo proyectivo para estimar el crecimiento de la demanda de transporte, permitiendo identificar rutas que requieren ampliación de zonas de servicio y los puntos críticos de congestión actuales y futuros.

**Palabras clave:** transporte público, Quito, economía del transporte, planificación del transporte, política de transporte

### **Abstract**

This study examines the intra-cantonal transportation system that connects the Río Coca terminal in Quito with the rural parishes of the Tumbaco Zonal Administration,



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



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

Recibido /  
Received:  
11/06/2024

Aceptado /  
Accepted:  
27/11/2024

Publicado en línea /  
Published online:  
08/05/2025



evaluating the factors that affect the mobility of users on long-distance trips from the urban hypercenter of Quito to rural areas. The urbanization dynamics reflected in the population growth rates of these areas are considered.

To achieve this, a review of publications between 1990 to 2023 was made, in the Scopus, Web Of Science, and Google Scholar databases, in English, Spanish and French with key words indexed in the UNESCO Thesaurus dictionary. For the analysis, scientometric tools such as Posit Cloud, tree of Science (Tos), Bibliometrix, VOSviewer were used and the inclusion criteria were the population rates between 1990 and 2001, which were significantly high in parishes such as Pifo (5.92 %), Puembo (5.25 %), Yaruquí (5.49 %), Checa (5.89 %) and El Quinche (5.93 %). Additionally, between 2001 and 2010, growth was recorded in Cumbayá (4.45 %).

The economic activity of the users was also taken into account. Data such as education, language and race were excluded. Based on this analysis, a model of growth in transport demand was developed, allowing the identification of routes that require the expansion of service areas, as well as current and future congestion points.

**Keywords:** public transport, Quito, transport economics, transport planning, transport policy

---

## INTRODUCCIÓN

Según el Plan Maestro de Movilidad del Distrito Metropolitano de Quito 2009-2025, la zona urbana de Quito concentra la mayor parte de la población económicamente activa. Como resultado, se registra una alta demanda de transporte público hacia el centro de la ciudad, dado que en esta área se localizan las principales fuentes de empleo y servicios. Los datos indican que aproximadamente el 64 % de los usuarios de transporte provienen de áreas periféricas o externas a la ciudad, mientras que el 36 % corresponde a residentes dentro del área urbana [1].

El *DMQ Distrito Metropolitano de Quito* cuenta con ocho administraciones zonales: Calderón, Centro Manuela Sáenz, Eloy Alfaro, Quitumbe, La Delicia, Los Chillos, Norte Eugenio Espejo y Tumbaco. La ADMINISTRACIÓN ZONAL TUMBACO está ubicada al centro oriente de Quito, y está conformada por 138 barrios y 35 comunas, de las parroquias rurales de Cumbayá, Tumbaco, Puembo, Pifo, Tababela, Yaruquí, Checa y El Quinche [2]. De acuerdo con los datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), en 2010 esta Administración tenía 87 834 habitantes, después, en 2020, contaba con una población total de 174 000 habitantes y se identificó que las parroquias con mayor crecimiento poblacional fueron Cumbayá y Tumbaco. En 2017, el Instituto Metropolitano de Planificación Urbana (*IMPU*) determinó que el 53.4 % de usuarios empleaban con mayor recurrencia el transporte público, mientras que el 19.4 % se movilizaba en automóvil o motocicleta, el 15.1 % a pie, el 3.2 % en taxis y solo una pequeña parte del 0.3 % en bicicleta, además se calculó que, de la mitad del total de 2 677 223 de viajes diarios en transporte público, la mitad de estos se realizaron por medio de Buses de Tránsito Rápido BRT y la otra mitad por buses convencionales e interparroquiales.



En 2018 se identificó que la problemática más común en la movilización fue que los habitantes realizaban viajes más largos debido a la localización de sus destinos finales [3]. De acuerdo con los datos de expansión, la zona urbana se expande a causa de la migración de la ciudad a estas zonas rurales, por la mejora de los servicios o las vías, para su acceso [2].

Por lo cual se hace importante estudiar la tendencia de expansión poblacional y planificar el servicio evitando colapsos o falta de servicio en el sector. La evolución del transporte público en la Terminal Río Coca, situada en la zona urbana de Quito, busca garantizar la equidad y la productividad para los usuarios del sistema. No obstante, podrían producirse colapsos en los servicios que dificulten su accesibilidad y multimodalidad [4, 5]. Para enfrentar estos desafíos, se implementan planes de movilidad que establecen métodos para optimizar los tiempos y costos de desplazamiento de personas y mercancías [6, 7]. Estos planes también incluyen el análisis del crecimiento poblacional, el uso del suelo y el impacto ambiental [8].

Se puede visualizar en la Figura 1 Administraciones Zonales Quito, Figura 2 Mapa de Ubicación de parroquias del cantón Quito.

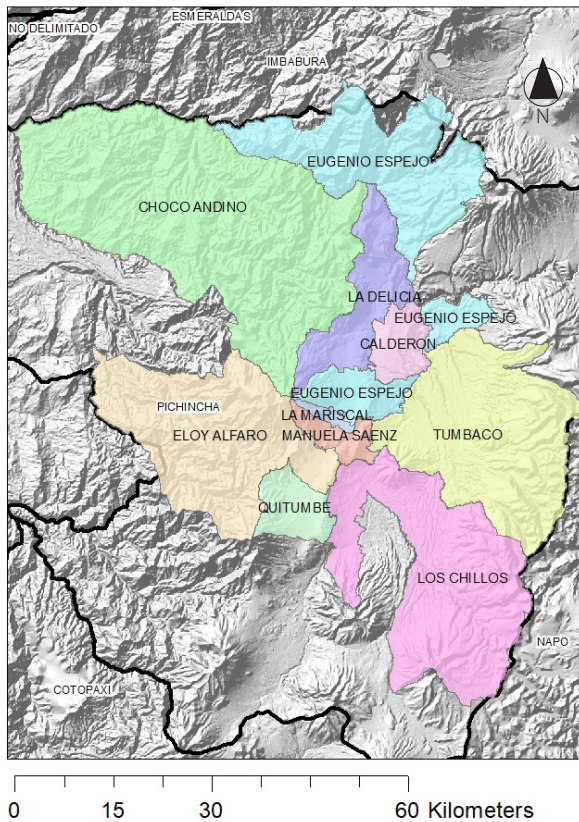
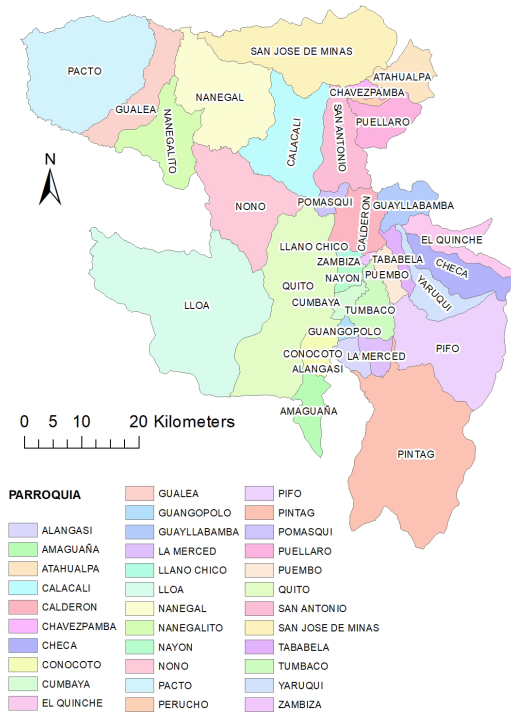


Figura 1. Administraciones Zonales Quito.



**Figura 2** Mapa de Ubicación de parroquias del cantón Quito.

En 2016, Cristian Yerovi [2] propuso un modelo de expansión suburbana en la ADMINISTRACIÓN ZONAL TUMBACO, utilizando técnicas de análisis multicriterio con el fin de identificar zonas óptimas de urbanización. Para el estudio se identificó que el ritmo de crecimiento se caracteriza por su fuerte dinámica de urbanización, identificable por una tasa de crecimiento poblacional alta en los dos períodos censales estudiados. En el período desde 1990 hasta 2001: Pifo 5.92 %, Puenbo 5.25 %, Yaruquí 5.49 %, Checa 5.89 %, El Quinche 5.93 %. Del mismo modo, en el período desde 2001 hasta 2010: Cumbayá 4.45 % y Pifo 3.33 %. Se concluyó que los flujos migratorios se han asentado en la ADMINISTRACIÓN ZONAL TUMBACO, es decir, se menciona que los habitantes siguen un patrón de desplazamiento hacia los límites, parecido a las ciudades de Estados Unidos, pues los habitantes dejan las ciudades para habitar las zonas no pobladas y generar ingresos económicos en la periferia.

En 2017 Marco Vásquez [9], realizó un inventario para identificar y catalogar los medios de transporte no tradicionales en las áreas rurales de Cumbayá, Tumbaco y Nayón, del cual se concluyó que, en las parroquias de Cumbayá y Tumbaco, no hay servicios de transporte público regulares hacia el sur urbano de Quito. Para cubrir esta necesidad, se ofrecen rutas directas de transporte público no convencional. Pero se identificó que, para las tres parroquias, sí se distribuyen líneas hacia el norte de Quito. Nayón cuenta con una línea de transporte público, EcoVía Q-24, que permite la movilización de los usuarios hasta la Estación Río Coca. Por otro lado, Tumbaco trabaja con la Cooperativa



de Transportes Tumbaco, que abastece a la demanda, con rutas que tienen origen en los barrios centrales, hasta la Terminal Río Coca. Cumbayá emplea la línea de transporte público, EcoVía Q-22, que llega hasta la Estación Río Coca.

Según los datos obtenidos en 2017, se registró información sobre las rutas utilizadas por algunas parroquias, los horarios de desplazamiento desde la terminal de origen hasta la parroquia de destino y la frecuencia del servicio de transporte en función de las necesidades en un período determinado, como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Rutas de transporte público convencional intracantonal de la Terminal Interparroquial Río Coca, en base al inventario realizado por Vásquez y Yerovi [2, 9].

N°	Origen	Destino	Línea de autobús	Horario	Frecuencia
1	Terminal de transporte microregional Río Coca	Parroquia rural de Tumbaco	Línea de autobús Tumbaco (IP-01 RÍO COCA)	05:00 – 23:00	15 minutos (Día ordinario) 20 minutos (Sábado y domingo)
2	Terminal de transporte microregional Río Coca	Parroquia rural de Puembo	Línea de autobús Puembo (IP-02 RÍO COCA)	05:00 – 23:00	15 minutos (Día ordinario) 20 minutos (Sábado y domingo)
3	Terminal de transporte microregional Río Coca	Parroquia rural de Pifo	Línea de autobús Pifo (IP-03 RÍO COCA)	05:00 – 23:00	15 minutos (Día ordinario) 20 minutos (Sábado y domingo)
4	Terminal de transporte microregional Río Coca	Parroquia rural de Yaruqui	Línea de autobús Yaruqui (IP-04 RÍO COCA)	05:00 – 23:00	15 minutos (Día ordinario) 20 minutos (Sábado y domingo)
5	Terminal de transporte microregional Río Coca	Parroquia rural de El Quinche	Línea de autobús El Quinche (IP-05 RÍO COCA)	05:00 – 23:00	15 minutos (Día ordinario) 20 minutos (Sábado y domingo)

De la tabla anterior se puede resaltar que las parroquias rurales analizadas disponen del servicio de transporte adecuado, en horarios extendidos desde la mañana, para dar cobertura a diferentes estratos de la población. Sin embargo, no se puede asegurar el estado del servicio que los usuarios disponen. Del inventario realizado en 2017, se identificó que las rutas que llegan hasta Cumbayá cobraban una tarifa normal de 0.25 centavos y reducida de 0.12 centavos, por otro lado, las rutas hasta Tumbaco cobraban una tarifa normal de 0.45 centavos y reducida de 0.12 centavos, lo cual evidencia que el costo depende de la distancia recorrida.

En 2019, Yerovi Garcés [2] busca evaluar el estado de seguridad vial que brindan a los peatones que acuden y circulan en las estaciones de transporte público “La Ofelia - Corredor Central Norte” ubicada en la Av. Diego de Vásquez y la estación “Río Coca -



Ecovía" ubicada en la Avenida Río Coca. Del estudio se describieron conceptos acerca del transporte y la seguridad vial, describiendo la modalidad de transporte terrestre urbano BRT y sus sistemas que funcionan en la ciudad de Quito.

Paula Rosero [1] planteó analizar las motivaciones para la realización de políticas y las consecuencias de la movilidad desde una perspectiva del transporte, finalmente se describe el desarrollo y función de las entidades responsables del transporte público en el Distrito Metropolitano de Quito, analizadas desde la perspectiva psicológica, que tiene como objeto entender las necesidades de las personas.

El Distrito Metropolitano de Quito cuenta con líneas de buses que se distribuyen dentro de la zona metropolitana y conecta con otras parroquias de las distintas Administraciones Zonales, como se muestra en la figura 2. Las zonas rurales tienen poca cobertura de la red de transporte que llega hasta el epicentro de Quito, por lo que se evidencia que las entidades administran el servicio de transporte mayormente a las Administraciones Zonales, Eugenio Espejo, Calderón, Manuela Sáenz y Quitumbe. Específicamente en la ADMINISTRACIÓN ZONAL TUMBACO, que es el área de interés de este estudio, existen pocas paradas de buses de transporte público, lo que representa una limitante para garantizar la movilidad de los habitantes de sus parroquias.

Ayala y Carrillo [7] desarrollaron un estudio basado en el análisis de la introducción de un sistema unificado de estacionamiento, autobuses alimentadores y estaciones, para verificar su influencia en el tiempo de viaje de los usuarios en comparación con aquellos que conducen vehículos privados hacia el centro de Quito durante las horas de mayor tráfico. Como resultado se identificó que, durante las horas de mayor tráfico, 11 448 vehículos viajan desde el Valle de los Chillos hacia el centro de la ciudad, con un pico en noviembre y diciembre, y una menor cantidad en julio y agosto. Esto resalta la necesidad de movilidad de los habitantes hacia la zona urbana de Quito. A pesar de que los resultados son representativos de otra administración zonal, son un indicador de los desplazamientos que las parroquias rurales requieren, por lo que se sugiere consultar la publicación original para más detalles.

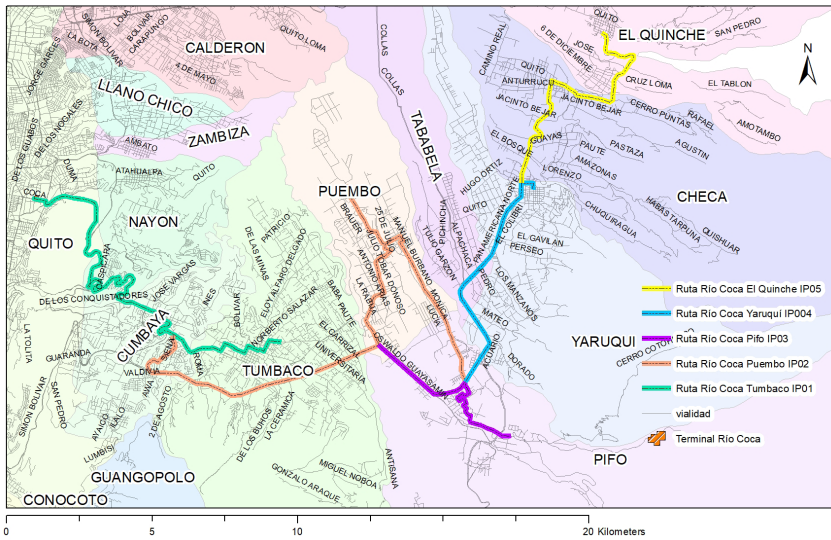
En 2022 Tardón et al [6] plantearon resolver el desafío de ubicar un transporte en el tiempo deseado por el usuario mediante el empleo de aplicaciones móviles, comunicación inalámbrica y tecnología electrónica. Del estudio realizado, se destaca la fundamentación teórica que plantea la importancia de la aplicación de la normativa del país para mejorar el desarrollo del transporte público y garantizar mejores beneficios económicos. Se hace énfasis en la Ordenanza Metropolitana No. 0201 de 2018, que establece las competencias del Administrador del Sistema de Transporte Público de Pasajeros del Distrito Metropolitano de Quito y las demás autoridades, para satisfacer las necesidades de los usuarios y garantizar un adecuado nivel de servicio. Además, menciona que la SMDMQ estableció en ese mismo año mecanismos para resolver los problemas del sistema de movilidad [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20].

En 2022, Ximena Morales [21] analizó el procedimiento normado para los procesos de habilitación por subdivisión en el Distrito Metropolitano de Quito, específicamente en la ADMINISTRACIÓN ZONAL TUMBACO, con el objetivo de detectar las condiciones de los aportes en áreas verdes comunitarias en dichos procesos. La investigación concluyó que



el Valle de Tumbaco es uno de los valles en los cuales la mancha urbana ha comenzado a expandirse debido a los procesos de habilitación de suelo de los años 2018, 2019 y 2020. Sin embargo, el crecimiento urbano en las zonas rurales se sigue desarrollando, y a pesar de que existen planes de ordenamiento territorial, persisten problemas en la estructuración de la ciudad hasta el año 2022. Debido a este crecimiento, se han implementado mecanismos de planificación que garantizan el acceso al servicio de transporte público y promueven el desarrollo de infraestructura vial.

La Terminal Río Coca se localiza en el centro de Quito. Este espacio público permite la transferencia de pasajeros desde las zonas rurales de las parroquias aledañas hacia las áreas del Distrito Metropolitano de Quito. Las rutas intracantoneñas ofrecen su servicio a través de distintas operadoras de buses, pero tienen coberturas limitadas, ya que algunas circulan solamente por las vías de primer orden que pasan por las parroquias [10], como se observa en la figura 3. Es importante considerar que las líneas de buses tienen rutas establecidas hasta un punto de destino, lo que permite a los usuarios conocer las paradas disponibles, la distancia hasta la terminal y el tiempo de circulación de los buses hasta sus lugares de preferencia.



**Figura 3.** Mapa de rutas intracantoneñas de transporte público de las parroquias de la Administración Zonal Tumbaco.

Byron Domínguez [8] publicó en 2024 un estudio que plantea como objetivo recolectar los datos primarios para elaborar el Plan Operacional de la primera línea del Metro de Quito proyectado para el año 2021. Este es un documento estratégico que define las políticas y estrategias para la operación del sistema de transporte masivo en la ciudad de Quito. A partir de los estudios analizados para el proyecto del metro, se identificó que hasta 2017, el subsistema convencional, combinado y rural, representaba el 10.40 % del total de viajes diarios en transporte público.



Para mitigar el riesgo de colapsos en el transporte público, es imprescindible implementar reformas estructurales en el sistema, considerando un análisis integral de los múltiples factores que inciden en el desarrollo urbano y la movilidad de la población [11]. Asimismo, resulta fundamental identificar los elementos clave para la planificación del transporte, dado que esta varía significativamente según las características de cada sector [12, 13].

La planificación del sistema de transporte debe incorporar la dinámica de los sectores productivos, cuya operatividad depende directamente de una movilidad eficiente [14, 15]. En este contexto, es esencial evaluar la relación costo-beneficio de las estrategias implementadas [16].

En el marco de esta investigación, se llevó a cabo un trabajo de campo con el objetivo de analizar la interacción entre producción y movilidad, permitiendo así identificar los sectores más críticos en términos de desarrollo del transporte [10, 17]. Adicionalmente, se realizaron encuestas para comprender la influencia de la actividad productiva y educativa en los patrones de desplazamiento. Es importante destacar que el análisis no contempló el nivel educativo de los encuestados, sino el requerimiento de transporte para la ejecución de actividades académicas [18, 19, 20].

En el caso de Quito urbano y rural, el crecimiento poblacional no planificado en los valles orientales que pertenecen a la ADMINISTRACIÓN ZONAL TUMBACO ha fomentado un mayor desarrollo comercial y residencial, dejando en segundo plano las actividades como la agricultura, ganadería y silvicultura [21]. De acuerdo con el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito (MDMQ), existen desafíos entre la zona urbana y rural debido a la falta de limitación demográfica [22], que genera nuevas necesidades de infraestructura vial y sanitaria, del servicio de transporte y el crecimiento disperso de la población [21].

Los usuarios acceden al transporte público por medio de paradas o estaciones, pagan una tarifa específica y esperan un tiempo mínimo hasta que el transporte llegue a la parada solicitada [8, 23]. Existe un acuerdo entre la Secretaría de Movilidad del Distrito Metropolitano de Quito (SMDMQ) y los gerentes de las cooperativas de buses para establecer únicamente los tiempos de salida de las terminales y en los puntos intermedios de control [24]. En 2003, se culminó la construcción de la Terminal Interparroquial Río Coca, ubicada en Quito, la cual permite la movilización de las personas hacia diferentes puntos de la ciudad: desde el centro-sur de la ciudad a través del sistema interparroquial y la ecovía, y desde el norte a través de las líneas alimentadoras. Este Sistema Integrado de Transporte Metropolitano de la ciudad formó parte de las iniciativas de la alcaldía, para garantizar un adecuado tránsito y transporte de la ciudad [1].

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realiza desde una perspectiva descriptiva exploratoria [25, 26], y desde el método de revisión sistemática y bibliográfica mixta [27, 28]. Para la descripción de fuentes de investigación y proceso de selección de fuentes, se trabajó con las bases de datos Scopus, Web Of Science y Dimensions, Google académico, en inglés, español y francés, seleccionando documentos en relevancia conforme al objetivo del estudio, que es analizar el desarrollo poblacional y económico frente al servicio de transporte



fluido en el sector de estudio. Se utilizaron técnicas bibliométricas de apoyo [29] como Bibliometrix, y tree of Science.

## Estrategia de búsqueda

Se realizó la búsqueda por palabras clave, considerando los términos relacionados con el transporte intercantonal que tiene origen en la zona urbana de Quito:

**1. Búsqueda 1:** transporte público, Terminal Río Coca, Quito.

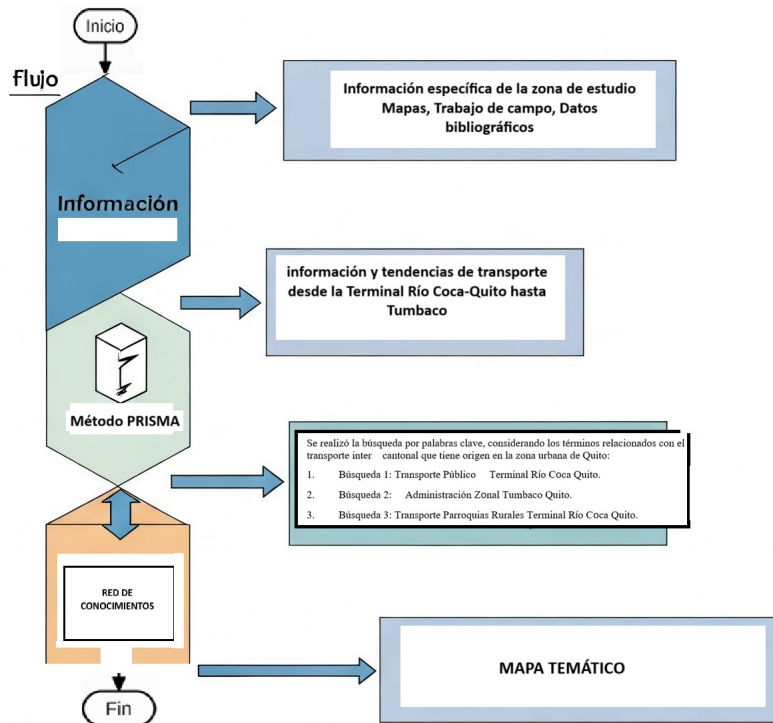
**2. Búsqueda 2:** administración Zonal Tumbaco Quito.

**3. Búsqueda 3:** transporte, parroquias rurales, terminal Río Coca, Quito.

Se buscó identificar, evaluar e interpretar la evidencia disponible de estudios ya realizados, para buscar información más relevante a una pregunta de investigación, como se ilustra en la figura 1 [30]. Para su desarrollo se toma como base la metodología PRISMA (**Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses**) que responde al problema de investigación, evalúa la información obtenida de fuentes reconocidas, y después organiza la información más relevante y finalmente analiza su utilidad en el campo de estudio [31].

Para las causas de posibles colapsos en transporte público y desarrollo de la planificación vial, se trabajó con las palabras clave de tesaurus de la UNESCO, dentro de los últimos 5 años.

Finalmente, con los resultados encontrados y visitas de campo, se realiza un álgebra de mapas, el cual se define como "Un conjunto de operaciones lógicas y matemáticas realizadas con los mapas". También se usó Geo estadística a fin de encontrar sectores de posible planificación de transporte en los próximos 20 años, donde, según lo encontrado, el servicio deja de ser eficiente. En la figura 4 se puede observar un resumen metodológico de la investigación.



**Figura 4.** Resumen metodológico de Investigación.

Se establece como centro de trabajo el analizar el sistema de transporte intracantonal combinado desde la terminal Río Coca de Quito hacia las parroquias rurales de la ADMINISTRACIÓN ZONAL TUMBACO, tomando en cuenta la dinámica de urbanización reflejada en las tasas de crecimiento poblacional para identificar rutas que requieren la expansión de las zonas de servicio, así como los puntos de congestión actuales y futuros.

Por último, se realiza una revisión bibliográfica enfocada en comparar a Quito, en lo referente a transporte público, con otras ciudades latinoamericanas.

## RESULTADOS

De las búsquedas realizadas, se obtuvieron inicialmente 2541 resultados, de los cuales se descartaron 2518 por no cumplir con los términos establecidos en la búsqueda, basados en el título y el resumen. Posteriormente, se analizaron en profundidad 23 artículos, los cuales fueron leídos en su totalidad, por lo que se excluyeron 15 por el mismo motivo, como se muestra en la figura 1.

En los trabajos seleccionados para la evaluación final, se observó que la mayoría de los trabajos de titulación presentaban limitaciones en el desarrollo de la información requerida.



Debido a esto, se procedió a buscar temas relacionados de forma segmentada, con el fin de integrar y sintetizar las ideas en común que fueran relevantes para el tema investigado

### Aprendizajes clave de los trabajos descartados

El alto número de estudios descartados evidencia que una proporción significativa de los trabajos revisados no se ajustaba plenamente al enfoque de la investigación, lo que indicó la necesidad de optimizar los filtros de búsqueda y ampliar el horizonte de revisión. Inicialmente, los criterios de inclusión y exclusión no estaban claramente definidos o aplicados de manera rigurosa, por lo que, en una segunda revisión, se priorizó la selección de estudios más relevantes. Además, se perfeccionó la estrategia de búsqueda mediante la refinación de palabras clave y términos específicos alineados con los objetivos de la investigación. Para mejorar la precisión, se recurrió al tesoro de la UNESCO, incorporando sinónimos más específicos que minimizaran la inclusión de estudios solo marginalmente relacionados.

Las principales causas de descarte de estudios incluyeron la falta de pertinencia temática en títulos o resúmenes, lo que permitió una preselección eficiente sin necesidad de revisiones exhaustivas; la redundancia de estudios similares o duplicados dentro de la base de datos; y la incompatibilidad de idioma o acceso, dado que se excluyeron aquellos publicados en lenguas distintas al inglés y español. Para optimizar la búsqueda, se implementaron operadores booleanos (AND, OR, NOT), permitiendo una combinación estratégica de términos que mejoró la precisión de los resultados. Asimismo, se refinó la aplicación de filtros temáticos y se incrementó la especificidad regional para asegurar una selección más relevante y alineada con los objetivos de la investigación.

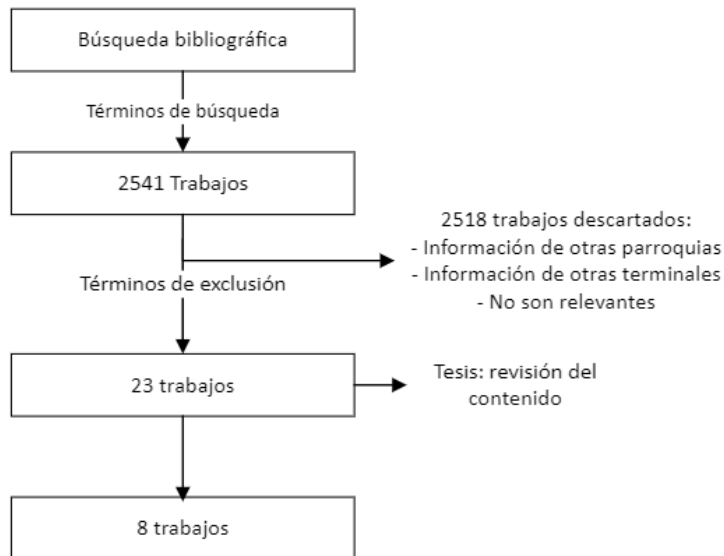


Figura 5. Diagrama de flujo para la categorización de estudios de revisión bibliográfica.



Tras realizar la búsqueda, se obtuvieron 775 resultados en la primera iteración, 1,070 en la segunda y 696 en la tercera. A partir de estos, se realizó una preselección de los estudios más relevantes. Posteriormente, un análisis más exhaustivo identificó 214 artículos, de los cuales se revisaron en profundidad 51, incluyendo los 8 previamente seleccionados. El análisis detallado de estos trabajos relevantes se presenta en la Tabla 3.

Desde el valle se movilizan los buses intracantoneles que conectan con la Terminal Río Coca, ubicada en la zona urbana de Quito, entre la avenida Río Coca y la calle de los Rosales. Esta terminal cuenta con conexiones de tipo intracantonal combinado, y ofrece 11 rutas que abastecen a los sectores que conectan con El Quinche, Checa, Yaruquí, Pifo, Puembo, Miravalle, Cumbayá, Lumbisí, El Arenal, La Morita, Collaqui, Aeropuerto y Guayllabamba.

De acuerdo con los datos de la Agencia Metropolitana de Tránsito (AMT), en el año 2008 se registraron al menos 47 000 viajes en transporte público desde Tumbaco y Cumbayá hasta el hipercentro de Quito. Según la proyección del Plan Maestro de Movilidad, para el año 2025 esta cifra sería de 76 000 desplazamientos [24, 32], motivo por el cual es importante estudiar la tendencia de expansión poblacional y planificar el servicio para evitar colapsos o la falta de servicio en el sector.

En la tabla 2 pueden observarse los criterios de revisión:

**Tabla 2.** Criterios de revisión de transporte público convencional intracantonal de la Terminal Interparroquial Río Coca, con base al inventario realizado por Vásquez y Yerovi en segunda revisión, con reestructuración de la ecuación de búsqueda [2, 9].

N°	Fuente de información	Ecuación de búsqueda	Palabras clave TESAURO UNESCO	Trabajos encontrados	Análisis
1	SCOPUS SCIENCE DIRECT	TRANSPORTE AND Parroquia rural de Tumbaco Línea de autobús Tumbaco (IP-01 RIO COCA) TRANSPORTE AND A Administración Zonal Tumbaco Quito	Economía del transporte Planificación del transporte Política de transporte Tráfico Transporte por carretera Transporte público Transporte rural Transporte urbano	115	31
2	IEEE Xplore	TRANSPORTE AND A Administración Zonal Tumbaco Quito	Economía del transporte Planificación del transporte Política de transporte	65	12
3	Web Of Science	TRANSPORTE AND A Administración Zonal Tumbaco Quito	Economía del transporte Planificación del transporte Política de transporte	56	12

En el tema de transporte urbano y rural las contribuciones son de similar densidad, de acuerdo a la herramienta VOSviewer, por lo cual no se estableció un orden de importancia al leer los autores.

## Análisis de trabajos citados

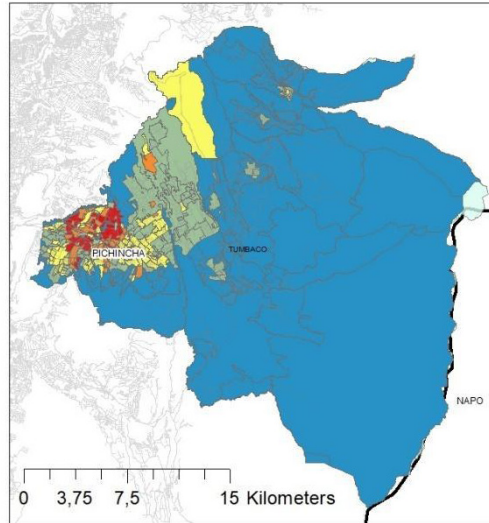
La tabla 3 presenta un análisis de los trabajos relevantes, y que son la base para realizar trabajo de campo posterior.

**Tabla 3.** Análisis de trabajos relevantes al estudio en cuanto a enfoque y objetivo.

Enfoque y objetivo	Coincidencia entre autores	Análisis	Bibliografía
Identificar factores que influyen en la movilización de los usuarios de transporte público.	Los factores más relevantes que influyen en los desplazamientos de larga distancia en transporte público son principalmente la búsqueda de oportunidades laborales, medios de subsistencia y opciones de vivienda.	La movilización desde el hipercentro urbano de Quito hacia las zonas rurales coincide con los patrones observados en estudios previos, evidenciando una dinámica de desplazamiento consistente con las tendencias de movilidad analizadas.	[4, 5, 33, 34, 35, 36, 37, 38]
Identificar dinámicas de urbanización en el período 2001-2010 y las razones por las que pueden influir en el aumento del uso del transporte público.	Estas dinámicas se reflejan en las tasas de crecimiento poblacional del período 2001-2010, impulsadas en gran medida por el costo del suelo y los usos funcionales del territorio.	Se identificaron tasas de crecimiento significativas en parroquias como Pifo (5,92 %), Puembo (5,25 %), Yaruquí (5,49 %), Checa (5,89 %) y El Quinche (5,93 %). Cumbayá también mostró un aumento poblacional notable (4,45 %).	[24, 32, 35, 39, 40, 41]
Buscar las bases de un modelo proyectivo para estimar el crecimiento de la demanda de transporte.	Se debe introducir herramientas SIG, y de análisis estadístico que permitan estimar la necesidad del transporte conforme su indicador de mayor crecimiento.	La actividad económica de los usuarios genera la necesidad de ampliar las zonas de cobertura del transporte en el área de estudio, así como de desarrollar nuevos centros y focos urbanos en respuesta al crecimiento urbanístico.	[8, 23, 42, 43, 44, 45]

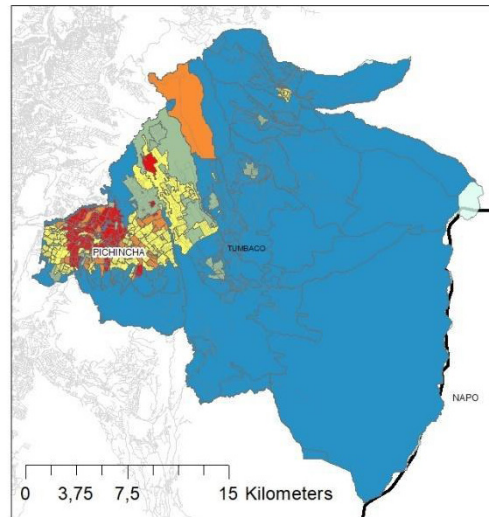
Se establece que, en los ejes principales de estudio, las actividades económicas son el principal motor de expansión del transporte. Además, se observa un crecimiento poblacional significativo, con una tendencia al alza.

Tras la realización del trabajo de campo, la revisión bibliográfica y la aplicación de encuestas y entrevistas, se identificaron las regiones que requieren atención y los posibles colapsos del transporte en los próximos 10 años. Los resultados se presentan en las figuras 6 y 7.



**SECTORES ACTUALES DE GESTIÓN DE TRANSPORTE**

- Poco o ningún servicio
- Problemas de calidad de servicio
- buenas condiciones de servicio
- Servicio activo, borde de Colapso
- excelentes condiciones de servicio



**CAMBIO DE CONDICIONES PARA GESTIÓN EN HORIZONTE 10 AÑOS**

- Poco o ningún servicio
- Problemas de calidad de servicio
- buenas condiciones de servicio
- Servicio activo, borde de Colapso
- excelentes condiciones de servicio

**Figura 6 y 7.** Condiciones actuales y futuras de transporte en la parroquia Tumbaco.



Los sectores que requieren planificación y reestructuración, debido a su desarrollo económico, volumen de usuarios y demanda de transporte, se presentan en la tabla 4. Estos están ordenados por prioridad en función de su planificación dentro de los sectores de mayor desarrollo urbano del estudio.

**Tabla 4.** Lugares prioritarios en la planificación de incremento de transporte urbano al 2024, trabajo de campo y recorrido por territorio.

Parroquia	Descripción	Parroquia	Descripción
Nayón	Urbanización Rancho San Francisco	Área Industrial - Vivienda	Urbanización La Cámara
	Club Rancho San Francisco		Sector Redondel San Patricio
	El Huerto de Nayón		Jardines del Este II
	Urbanización Rancho San Francisco		Urbanización Jardines del Este
	Urbanización Portal del Sol		Urbanización Auqui Chico
	El Huerto de Nayón		Urbanización Pillagua I y II
	Urbanización Jardines de Santa Inés		Vía de acceso a Pillagua
Cumbayá: Desarrollo alto	Urbanización Portal de Cumbayá I	Cumbayá: Desarrollo medio-alto	Sector Hospital Los Valles
	Urbanización Lomas de Cumbayá		Eje a la vía Interoceánica
	Urbanización Los Eucaliptos		Urbanización La Vieja Hacienda
	Urbanización Santa Lucía		Urbanización Cumbres del Valle

Los estudios revisados proporcionan una comprensión detallada de las definiciones del marco teórico para contextualizar las necesidades de los usuarios en cuanto a su movilidad, el uso del transporte público y las competencias establecidas por la SMDMQ, que sirven como base para garantizar un sistema de movilidad adecuado en un cantón.

Además, los conceptos de gestión del transporte público terrestre urbano se centran en los componentes que permiten su funcionamiento: las unidades de transporte, los usuarios, los operadores y las frecuencias. También incluyen el análisis de datos numéricos provenientes de fuentes oficiales sobre el uso de diferentes modos de transporte y los factores que influyen en la movilidad hacia las zonas periféricas del cantón Quito.

Asimismo, se identificó un estudio sobre los referentes de la política de movilidad, el cual analiza la evolución y la importancia de la gestión de las líneas de transporte público en Quito. De este se desprende que, desde 2018, la Alcaldía ha promulgado ordenanzas para garantizar el acceso adecuado al transporte público.

Se examinan las directrices para la ocupación del suelo, conforme a la normativa jurídica del Código Orgánico de Organización Territorial (COOTAD) y el Plan de Uso y Ocupación



del Suelo (PUOS) , los cuales establecen los criterios de urbanización considerando aspectos físicos, sociales y normativos para garantizar una conectividad acorde con el crecimiento poblacional. Además, se sintetiza la información sobre las parroquias que conforman la ADMINISTRACIÓN ZONAL TUMBACO y su expansión territorial. Finalmente, se profundiza en los desafíos derivados de la falta de planificación en la ubicación de zonas residenciales e industriales, lo que origina nuevas necesidades de transporte a otras áreas alejadas de la zona urbana.

Del estudio realizado en la ADMINISTRACIÓN ZONAL TUMBACO, se evidencia que las parroquias de Tumbaco y Cumbayá cuentan con un mayor número de operadores de transporte público. Sin embargo, es en Cumbayá donde se registra un mayor desarrollo económico y poblacional, por lo que los autores centran su interés en analizar el transporte en esta parroquia. Es en esta locación donde los habitantes dependen de la oferta de buses de transporte público, y mediante la actividad de campo, se determinó en qué zonas la demanda es suficiente para garantizar la sostenibilidad del servicio desde el origen hasta el destino de las líneas de buses, así como las áreas donde existen quejas sobre el número y la calidad del servicio. Finalmente, se identifican las siguientes similitudes en el desarrollo demográfico y económico de Quito en comparación con otras ciudades latinoamericanas, especialmente en los factores que influyen en la expansión del sistema de transporte: crecimiento económico, urbanización y características geográficas de la región. En la Tabla 5 se presentan los factores comunes que han impulsado el desarrollo del transporte en diversas ciudades de Latinoamérica.

**Tabla 5.** Lugares de prioridad en la planificación de incremento de transporte urbano al 2024, trabajo de campo y recorrido por territorio.

Factor de comparación	Ciudades similares	Análisis	Bibliografía
Similitudes geográficas	Quito, La Paz, Bogotá	Se encuentran similitudes en los desafíos de infraestructura y en los patrones de movilidad de manera general. Áreas residenciales distribuidas en diversas altitudes.	[44, 46, 47, 48]
Transporte urbano en constante desarrollo	Bogotá, Quito, La Paz	Sistemas de transporte público en desarrollo y comparten problemas similares de congestión y falta de conectividad en áreas periféricas. Bogotá ha desarrollado sistemas como el TransMilenio (un sistema BRT) y, en Quito, el sistema trolebús y el metro	[49, 50, 51, 52, 53]
Desarrollo turístico	Montevideo, Cusco, Bogotá	Ciudades de gran importancia histórica y cultural, con un centro histórico bien conservado y un flujo constante de turistas.	[49, 52, 53, 54, 55]
Desarrollo urbano y expansión	Bogotá, en Colombia Montevideo, en Uruguay Lima, Cusco, en Perú	Comparte con Quito el desafío de la expansión urbana y la planificación de transporte en un contexto de crecimiento poblacional, congestión, movilidad e infraestructura.	[46, 49, 52, 53, 54, 55]



Factor de comparación	Ciudades similares	Análisis	Bibliografía
Crecimiento poblacional y urbanización	San Salvador, en El Salvador Montevideo, en Uruguay	El acelerado crecimiento poblacional y el proceso de urbanización ejercen una presión significativa sobre el sistema de transporte y la infraestructura, especialmente en la periferia inmediata.	[49, 56, 57]
Desafíos económicos	Latinoamérica presenta desafíos económicos similares a nivel regional	Los sectores de alta pobreza presentan deficiencias en el acceso al transporte y a los servicios urbanos, lo que se traduce en limitaciones en la movilidad y dificultades para acceder a las zonas donde se concentran las actividades económicas, debido a las grandes distancias que deben recorrer sus habitantes.	[56, 58, 59, 60]

Aunque no existe una ciudad en Latinoamérica que sea una réplica exacta de Quito, su comparación con La Paz, Cusco, Bogotá o San Salvador proporcionan una visión valiosa sobre las dinámicas de crecimiento urbano, los desafíos en el transporte público y la planificación. Estas ciudades comparten características como un tamaño medio, una población en crecimiento y una notable influencia cultural e histórica.

El estudio realizado se enfoca en la práctica de la ingeniería de transporte y destaca que el crecimiento poblacional influye en las necesidades de movilidad. Los estudios resaltan que la oferta de transporte solo es viable si la demanda es suficiente para operar a grandes distancias. Es decir, para que las unidades funcionen de manera eficiente, debe garantizarse un número mínimo de usuarios en todas las frecuencias y horarios.

Dado que los buses públicos son proporcionados por entidades gubernamentales, la cantidad de operadoras se define en función de la demanda a lo largo de sus rutas. En cuanto a las implicaciones políticas, los autores citados subrayan la importancia de cumplir con las ordenanzas y normativas que aseguran una movilidad adecuada para los pasajeros.

## CONCLUSIONES

La planificación urbana ha sido un desafío constante en las parroquias rurales a lo largo de los años. A pesar de la existencia de políticas para regular los asentamientos y el uso del suelo, el crecimiento económico en zonas urbanas y rurales ha impulsado tanto el desarrollo productivo como el residencial. Con el congestionamiento de las áreas económicas en Quito, también han aumentado su desarrollo las zonas rurales, como resultado, la demanda de transporte ha aumentado, ya que cada vez más personas viajan desde las zonas urbanas para trabajar en las rurales, lo que ha generado la necesidad de expandir las rutas de transporte, como el caso de estudio objeto de esta investigación.

Este fenómeno se refleja en un cambio en los patrones de horas pico, que ahora ocurren en ambos sentidos, algo que hace solo cinco años era poco común. Se han identificado tasas de crecimiento significativas en parroquias como Pifo, Pumbo, Yaruquí, Checa y



El Quinche. En los últimos diez años, Cumbayá ha sido el sector de mayor expansión, lo que ha generado una creciente demanda de nuevas rutas y líneas de buses.

Para fundamentar la necesidad de reestructurar los sistemas de transporte en sectores como Cumbayá y Nayón, es crucial un enfoque meticuloso basado en trabajo de campo. La revisión de transporte y movilidad requiere no solo la recopilación, sino también la actualización continua de datos empíricos que reflejen patrones actuales de desplazamiento, necesidades de accesibilidad y puntos de congestión o saturación.

La revisión de datos sobre el tráfico y los patrones de movilidad peatonal permite detectar inconsistencias o cambios significativos en el comportamiento de los usuarios. Este tipo de trabajo ayuda a identificar si los datos existentes reflejan la realidad actual, o si han ocurrido modificaciones recientes en las rutas utilizadas, el volumen de tránsito, o los tiempos pico que afecten la eficiencia de los sistemas de transporte.

De acuerdo con las políticas y normas vigentes que priorizan la prestación eficiente del servicio de transporte, se han implementado acciones orientadas a optimizar los tiempos de desplazamiento de los usuarios y a ajustar la oferta de unidades de transporte a la demanda en cada parroquia rural.

Es fundamental que las autoridades gubernamentales coordinen de manera estrecha las necesidades de la población con la provisión de un sistema de transporte público adecuado, pues este constituye un recurso esencial para impulsar el desarrollo económico, social y cultural en las parroquias de todo el cantón.

## DISCUSIÓN

Como lección aprendida y mejora para futuros estudios, se podría implementar una metodología de búsqueda que integre algoritmos de aprendizaje automático o inteligencia artificial. Esto permitiría priorizar los trabajos más relevantes mediante una búsqueda en etapas: primero, una revisión inicial rápida para realizar un filtrado preliminar basado en criterios generales; luego, un análisis detallado de los trabajos que superen esta primera selección.

En relación con las modificaciones en las medidas sanitarias y los protocolos de bioseguridad en los sistemas de transporte público, se observa un fortalecimiento de los procedimientos de limpieza, con la implementación de desinfecciones frecuentes en vehículos y estaciones. Durante el período cercano a la pandemia, se estableció el uso obligatorio de mascarillas y, en algunos casos, se instalaron barreras de separación entre conductores y pasajeros. Asimismo, se adoptó el concepto de aforo controlado para facilitar el distanciamiento físico, especialmente en las horas de mayor demanda.

Es importante destacar que, durante el confinamiento, el uso del transporte público disminuyó drásticamente debido al teletrabajo y a las restricciones de movilidad.

En el período postpandemia, numerosos sectores económicos adoptaron esquemas laborales más flexibles, incluyendo el trabajo remoto, lo cual ha modificado los horarios



de mayor demanda, afectando los patrones tradicionales de uso del transporte público. En algunas regiones, la preocupación por el contagio también impulsó un incremento en el uso de bicicletas, caminatas y vehículos privados como alternativas de movilidad.

Entre las mejoras al transporte público impulsadas por la pandemia se destacan los sistemas de pago sin contacto y la actualización de aplicaciones de transporte, que ahora ofrecen información en tiempo real sobre los niveles de ocupación, facilitando así la planificación de viajes en horarios menos congestionados.

En cuanto al rediseño de rutas y servicios, los sistemas de transporte han ajustado tanto las rutas como las frecuencias para adaptarse a los cambios en los patrones de movilidad, enfocando los recursos en áreas de mayor demanda.

Los estudios realizados hace cinco años pueden proporcionar información valiosa y servir como base para el análisis actual, especialmente, cuando se enfocan en tendencias a largo plazo. Aquellas investigaciones que abordan temas como las proyecciones de crecimiento poblacional y la expansión de áreas urbanas mantienen su relevancia, ya que estas tendencias suelen ser estables a lo largo del tiempo, convirtiéndolos en una base sólida para la planificación. Sin embargo, las políticas públicas y las regulaciones relacionadas con el transporte, las emisiones, la sostenibilidad y la infraestructura pueden haber experimentado cambios significativos en los últimos cinco años. Estos avances hacen que los estudios anteriores no reflejen las realidades regulatorias y de planificación vigentes en la actualidad.

En lo referente a la comparación de Quito con otras ciudades latinoamericanas, como La Paz, Cusco, Bogotá y San Salvador, se destacan similitudes en su dinámica de crecimiento urbano, los desafíos en el transporte público y los procesos de planificación. Estas ciudades comparten características comunes, como el aumento poblacional y una fuerte influencia cultural e histórica, lo que genera contextos urbanos complejos que requieren soluciones adaptadas a sus necesidades particulares.

## **CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES**

Alisson Dayana Álvarez desarrolló la metodología, la investigación original y corrección. Gabriela Solange Muñoz desarrolló la metodología, la investigación original. Fausto Rodríguez realizó la conceptualización y validación. Mónica Delgado realizó la revisión final, revisión metodológica, dirección de encuestas, geoestadística, revisión y corrección.

## **CONFLICTO DE INTERÉS**

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

## REFERENCIAS

- [1] Rosero Carrión, P. G. (2020). Los referenciales en la política de movilidad dentro del Distrito Metropolitano de Quito, durante el periodo 2014-2019 Tesis de licenciatura,. Universidad de las Américas <https://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/12294>
- [2] Yerovi Garcés, C. A. (2016). *Escenarios de crecimiento suburbano utilizando técnicas de "evaluación multicriterio" en la Administración Zonal Tumbaco del Distrito Metropolitano de Quito* [Tesis de licenciatura, Universidad San Francisco de Quito]. <https://repositorio.usfq.edu.ec/jspui/bitstream/23000/12716/1/322869.pdf>
- [3] Harnisth Rivadeneira, A. D. (2019). *Evaluación de la seguridad vial para los peatones que desembarcan y transitan en los terminales de autobuses públicos de la Estación de La Ofelia (corredor central norte) y la Estación Río Coca (Ecovía)* (Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Ecuador). <https://es.scribd.com/document/464208952/TESIS-EVALUACION-SEGURIDAD-VIAL-ESTACION-LA-OFELIA-Y-RIO-COCA>
- [4] Dans, E., & Seisedos, G. (2016). *Upgrading urban mobility*. [https://www.enriquedans.com/wp-content/uploads/2016/02/UpgradingUrbanMobility\\_def.pdf](https://www.enriquedans.com/wp-content/uploads/2016/02/UpgradingUrbanMobility_def.pdf)
- [5] Campos, Á. P. (1991). El sistema de información geográfica: un instrumento para la planificación y gestión urbana. *Geographicalia*, (28).
- [6] Tardón, C., Mateos, D., Domínguez, M., Martín, M., & Juan, I. (2022). *Tecnología y accesibilidad para la salud mental: Experiencias y perspectivas de futuro*. Ceapat-Ministerio de Derechos sociales y Agenda 2030.
- [7] Ayala Nupan, A. C., & Carrillo Rios, M. L. (2023). *Evolución de los servicios de transporte y seguros internacionales de bienes entre Colombia y los Estados Unidos de América* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia] <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/7846>
- [8] Domínguez Zambrano, B. L. (2024). *Elaboración del plan operacional para la prestación del servicio de la primera línea metro de Quito, periodo 2021* [Tesis de licenciatura, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/20160>
- [9] Vásquez Tapia, M. P. (2017). *Inventario del transporte público no convencional en las parroquias rurales de Cumbayá, Tumbaco y Nayón* [Tesis de licenciatura o maestría]. [Nombre de la universidad]. <http://bibliotecavirtualoducal.uc.cl/vufind/Record/oai:localhost:123456789-1436320>
- [10] Gutiérrez, A. I. (2012). ¿Qué es la movilidad?: *Elementos para (re) construir las definiciones básicas del campo del transporte*. <https://www.redalyc.org/pdf/748/74826255011.pdf>
- [11] Cortés Salinas, A. A., & Figueroa Martínez, C. A. (2013). Fronteras de movilidad: oportunidades y obstáculos urbanos del sistema de transporte público de Santiago de Chile. *Estudios Socioterritoriales*, 13. [https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1853-43922013000100006&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1853-43922013000100006&script=sci_arttext)
- [12] Montañez, M. (2016). Un nuevo modelo de transporte para el gran Santo Domingo. *Ciencia y sociedad*, 41(2), 337-359. <https://www.redalyc.org/pdf/870/87046120005.pdf>
- [13] Klein, R. (1985). Deficiencias del transporte público en el espacio burgalés. *Estudios Geográficos*, 46(180). <https://www.proquest.com/openview/601993faacd0fa97e28499031a14568c/1?cbl=1818083&ppq-origsite=gscholar>
- [14] Cortés Salinas, A. A., & Figueroa Martínez, C. A. (2013). Fronteras de movilidad: oportunidades y obstáculos urbanos del sistema de transporte público de Santiago de Chile. *Estudios Socioterritoriales*, 13. [https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1853-43922013000100006&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1853-43922013000100006&script=sci_arttext)
- [15] Corvalán, A. L. (2008). Transporte, movilidad y exclusión: el caso de Transantiago en Chile. *Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales, Barcelona*, 12(270). <https://ingenieria.uncuyo.edu.ar/catedras/transporte-movilidad-y-exclusion-el-caso-de-transantiago-en-chile.pdf>
- [16] Jara Alata, A. (2016). *Transporte público sostenible en Lima: una aproximación al análisis coste-beneficio entre los sistemas BRT y LRT* [Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de Catalunya].
- [17] Rojas Amaya, J. S. (2014). Elementos para la integración de sistemas de gestión y su importancia en la cadena productiva del transporte de carga terrestre en Colombia. *Suma de negocios*, 5(12). [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S2215-910X2014000300136&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S2215-910X2014000300136&script=sci_arttext)

- [18] Porras Moreno, A. M. (2012). Diagnóstico del proceso contable de la compañía Operadora de Transporte Optransa SA de la ciudad de Huaquillas y propuesta de análisis e interpretación de los estados financieros de los años 2010-2011 para la toma de decisiones [Tesis de licenciatura, Universidad Técnica de Machala]
- [19] Sagastizabal, M. D. L. Á., & Miano, A. (2010). Aprendizaje escolar y posibilidades de inserción laboral aportes desde una investigación de campo en dos pueblos de la provincia de Santa Fe. *Investigación y Postgrado*, 25(1). [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1316-00872010000100002](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-00872010000100002)
- [20] Bulhões, M (2017). *Colapso urbano?*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Federal de Alagoas] <https://www.repositorio.ufal.br/handle/123456789/9807>
- [21] Morales Bucheli, X. F. (2022). *Análisis de los procesos de habilitación del suelo (subdivisiones) de la zona administrativa Tumbaco del Distrito Metropolitano de Quito* [Tesis de licenciatura, Universidad Católica del Ecuador] <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/13617>
- [22] Franco Pinto, A. S. (2021). *Impacto en la aplicación de una guía administrativa en la emisión de frecuencias extraordinarias del servicio interprovincial de la terminal terrestre de Carcelén del DMQ 2018/2019* [Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana Ecuador]. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21144>
- [23] Municipio de Quito. (2009). *Plan Maestro de Movilidad 2009-2025*. <https://biblio.flacoandes.edu.ec/libros/digital/58541.pdf>
- [24] Ruiz Sánchez, J. J., & Tello Guerra, J. A. (2019). *Diseño e implementación de un prototipo multiplataforma que permita el monitoreo y control de rutas del sistema de transporte público*. [Tesis de licenciatura, Universidad de las Américas] <https://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/10883>
- [25] Nieto, E. (2018). *Tipos de investigación*. <https://core.ac.uk/download/pdf/250080756.pdf>
- [26] Pulido Polo, M. (2015). Ceremonial y protocolo: métodos y técnicas de investigación científica. *Revista de Ciencias Humanas y Sociales*, 1137-1156. <https://www.redalyc.org/pdf/310/31043005061.pdf>
- [27] García, C. S. R. (2016). Investigación científica. *Revista Científica Alas Peruanas*, 1(2). <http://revistas.uap.edu.pe/ojs/index.php/SD/article/download/889/705>
- [28] Prieto, M. S., & Rumbo-Prieto, J. M. (2018). La revisión sistemática: pluralidad de enfoques y metodologías. *Enfermería clínica*, 28(6). <https://doi.org/10.1016/j.enfcli.2018.08.008>
- [29] Salinas-Ríos, K. (2022). Bibliometrics, a useful tool within the field of research. *Journal of Basic and Applied Psychology Research*, 3(6). <https://doi.org/10.29057/jbapr.v3i6.6829>
- [30] Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L. A., ... Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista española de cardiología*, 74(9), 790-799. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300893221002748>
- [31] Gómez-Luna, E., Fernando-Navas, D., Aponte-Mayor, G., & Betancourt-Buitrago, L. A. (2014). Literature review methodology for scientific and information management, through its structuring and systematization Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización. *Dyna*, 81(184). <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n184.37066>
- [32] Paucar Quinga, L. F. (2019). *Análisis de la influencia de la implementación de un sistema integrado de transporte y el metro, frente al uso de vehículos particulares hacia el hipercentro del DMQ desde los valles*. [Tesis de maestría, Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20609>
- [33] Artacho, C. I. (2017). *Opciones de movilidad. Desplazamientos urbanos cotidianos en un barrio no motorizado surcado por autopistas urbanas* [Tesis doctoral, Pontificia Universidad Católica de Chile]. <https://estudiosurbanos.uc.cl/wp-content/uploads/2017/05/TESIS-CIA.pdf>
- [34] Durán, G., Costa, M. M., & Mérida, J. (2016). Crecimiento, segregación y mecanismos de desplazamiento en el periurbano de Quito. *Íconos: Revista de Ciencias Sociales*, (56).
- [35] Janoschka, M. (2016). Gentrificación, desplazamiento, desposesión: procesos urbanos claves en América Latina. *Revista invi*, 31(88). <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-83582016000300002>

- [36] Moreno Luna, C. A. (2017). *Pobreza y movilidad cotidiana: Realidades en Bogotá y Soacha, Colombia*. [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona]. <https://www.tesisenred.net/handle/10803/458686#page=1>
- [37] Hermida, Carla, Cordero-Salcedo, Manuela, Eljuri Gabriela, Fajardo, Gabriela, Serrano-Fernandez de Córdova, Erick (2023). Movilidad cotidiana de estudiantes universitarios. *Estoa* 23, 12 (23). <https://doi.org/10.18537/est.v012.n023.a02>
- [38] Reillo, F. C., Arce, R. H. A., Laffont, I. F., Martín, M. D. C. B., & Villa, S. G. (2020). *Los múltiples caminos a la subsistencia: Movilidades y accesibilidad desde espacios no centrales de la metrópoli*. Editorial Universidad de Guadalajara.
- [39] Durán, G., Córdova, M., & Bonilla, A. (2018). Morfologías fragmentadas de la periurbanización en América Latina: Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador (2001-2010). En *Ciudad y formas urbanas: Perspectivas transversales* (pp. 45). Institución "Fernando el Católico". II Congreso Internacional ISUF Zaragoza. [https://eventos.unizar.es/\\_files/\\_event/\\_11844/\\_editorFiles/file/Publicaciones/Volumen%209%20Actas%20Congreso%20ISUF-H.pdf](https://eventos.unizar.es/_files/_event/_11844/_editorFiles/file/Publicaciones/Volumen%209%20Actas%20Congreso%20ISUF-H.pdf)
- [40] Marengo, M. C., & Lemma, M. (2017). Ciudad dispersa y fragmentada: Lecturas de forma urbana en emprendimientos habitacionales privados, Córdoba 2001-2010. *Cuaderno urbano*, 22(22). [https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1853-36552017000100001&script=sci\\_abstract&tlng=en](https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1853-36552017000100001&script=sci_abstract&tlng=en)
- [41] Rodríguez, C. P. (2018). *Segregación en Quito 2001-2010: Evolución de la concentración de los grupos y composición social de las áreas residenciales*. [https://www.researchgate.net/profile/Cristhian-Parrado-Rodriguez/publication/330465943\\_Segregacion\\_en\\_Quito\\_2001-2010\\_Evolucion\\_de\\_la\\_concentracion\\_de\\_los\\_grupos\\_y\\_composicion\\_social\\_de\\_las\\_areas\\_residenciales/links/5c414137299bf12be3d048d5/Segregacion-en-Quito-2001-2010-Evolucion-de-la-concentracion-de-los-grupos-y-composicion-social-de-las-areas-residenciales.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Cristhian-Parrado-Rodriguez/publication/330465943_Segregacion_en_Quito_2001-2010_Evolucion_de_la_concentracion_de_los_grupos_y_composicion_social_de_las_areas_residenciales/links/5c414137299bf12be3d048d5/Segregacion-en-Quito-2001-2010-Evolucion-de-la-concentracion-de-los-grupos-y-composicion-social-de-las-areas-residenciales.pdf)
- [42] Alegre, M. M. (2009). Servicio de transporte terrestre de pasajeros¿ Servicio Público? Necesidad de una correcta conceptualización para su mejor prestación. *Revista de Derecho Administrativo*, (7). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8176767>
- [43] García-Schilardi, M. E. (2014). Transporte público colectivo: su rol en los procesos de inclusión social. *Bitácora Urbano Territorial*, 24(1). [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0124-79132014000100035&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0124-79132014000100035&script=sci_arttext)
- [44] Serrano, A. L., Farfán, M. E., Rodas-Pesantez, J. E., & Villafuerte-Pucha, E. (2020). Análisis del sistema turístico de tres ciudades patrimoniales de América, Cuenca, Cusco y Puebla. *Universidad-Verdad*, 1(76). <https://prisma.uazuay.edu.ec/index.php/udaver/article/view/270>
- [45] Valverde Silva, J. V. (2022). Gestión en infraestructura vial y evaluación de la calidad del servicio en la ampliación norte del metropolitano, 2021. [Tesis de Maestría, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional – Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/78231>
- [46] Guevara, T. (2015). Abordajes teóricos sobre las transformaciones sociales, económicas y territoriales en las ciudades latinoamericanas contemporáneas. *EURE (Santiago)*, 41(124). [https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0250-71612015000400001&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0250-71612015000400001&script=sci_arttext)
- [47] Jajamovich, G. P., Cortés Morales, A., & Arango, D. (2016). *Ciudad latinoamericana: teorías, actores y conflictos*. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/179444>
- [48] Rodríguez, J., & Arriagada, C. (2004). Segregación residencial en la ciudad latinoamericana. *Eure (Santiago)*, 30(89). <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612004008900001>
- [49] Figueroa, O. (2001). Políticas de desarrollo y políticas de transporte urbano: Coherencias y contradicciones. *La ciudad construida. Urbanismos en América Latina*. FLACSO. <https://www.flacso.edu.ec/portal/files/docs/sfcccfigueroa.pdf>
- [50] Figueroa, O. (2005). Transporte urbano y globalización: Políticas y efectos en América Latina. *Eure (Santiago)*, 31(94). [https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0250-71612005009400003&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0250-71612005009400003&script=sci_arttext)
- [51] Moller, R. (2006). *Transporte urbano y desarrollo sostenible en América Latina: el ejemplo de Santiago de Cali, Colombia*. Programa Editorial Universidad del Valle.
- [52] Chaparro, I. (2002). *Evaluación del impacto socioeconómico del transporte urbano en la ciudad de Bogotá: el caso del sistema de transporte masivo Transmilenio*. Cepal. <https://repositorio.cepal.org/entities/publication/19d62aac-1adb-4a9a-abbb-851120bc1838>
- [53] Triana, R. E. (1996). Sociedad y transporte urbano en Bogotá 1865-1950. *Memoria y sociedad*, 1(2).
- [54] Ramírez, J. A. (2016). *Los centros de conexiones y su influencia económica y turística: Caso Aeropuerto Daular de Guayaquil* [Tesis de licenciatura, Universidad de Especialidades Espíritu Santo]. <http://201.159.223.2/handle/123456789/2046>



- [55] Serrano, A. L., Farfán, M. E., Rodas-Pesantez, J. E., & Villafuerte-Pucha, E. (2020). Análisis del sistema turístico de tres ciudades patrimoniales de América, Cuenca, Cusco y Puebla. *Universidad del Azuay*, 1(76). <https://prisma.uazuay.edu.ec/index.php/udaver/article/view/270>
- [56] Calatayud, A., Sánchez González, S., Bedoya Maya, F., Giraldez Zúñiga, F., & Márquez, J. M. (2021). Congestión urbana en América Latina y el Caribe: características, costos y mitigación. *BID*. <http://dx.doi.org/10.18235/0003149>
- [57] Poole Fuller, E. (2017). ¿Hacia una movilidad sustentable? Desafíos de las políticas de reordenamiento del transporte público en Latinoamérica. El caso de Lima. *Letras Verdes, Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, (21). <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.21.2017.2445>
- [58] Acquatella, J. (2001). *Aplicación de instrumentos económicos en la gestión ambiental en América Latina y el Caribe: desafíos y factores condicionantes*. Cepal. <https://repositorio.cepal.org/entities/publication/1a925e69-f62e-4b04-8ba8-57399928f424>
- [59] Gregorio, J. D. (2008). El crecimiento económico de América Latina. Del desencanto del siglo XX a los desafíos del XXI. *El trimestre económico*, 75(297), 5-45. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2448-718X2008000100005&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2448-718X2008000100005&script=sci_arttext)
- [60] Winchester, L. (2006). Desafíos para el desarrollo sostenible de las ciudades en América Latina y El Caribe. *EURE (Santiago)*, 32(96), 7-25. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612006000200002>

## Diversidad de fitoplancton y estado trófico actual de un lago de alta montaña de la provincia de Imbabura, Ecuador

Andrés Arévalo<sup>1\*</sup>, Diana Ontaneda<sup>2</sup>, Mabel Cadena<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Central del Ecuador, Av. Universitaria, Quito, 170521, Ecuador.

<sup>2</sup>Área de limnología, Departamento de Recursos Hídricos, Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento, Quito 170521, Ecuador.

<sup>3</sup>Universidad Metropolitana del Ecuador, Quito 170521, Ecuador.

\* Autor para Correspondencia / Corresponding Author e-mail: [andresare\\_bio@hotmail.com](mailto:andresare_bio@hotmail.com)

## Phytoplankton diversity and current trophic status of a high mountain lake in the province of Imbabura, Ecuador

### Resumen

El objetivo de la presente investigación fue determinar la diversidad de fitoplancton y, con base en su composición, establecer el estado trófico actual del lago San Pablo. Se recolectaron muestras durante los meses de mayo, junio, julio y agosto de 2023 para considerar la variabilidad estacional. La identificación taxonómica y el registro fotográfico se realizaron mediante un microscopio invertido con una cámara acoplada. Se identificaron 77 especies de microalgas y cianobacterias pertenecientes a 8 phyla. Los más representativos fueron Heterokontophyta, con el 31 % del total de las especies, seguido de Chlorophyta (25 %) y Charophyta (17 %). La densidad celular fue más alta en mayo, alcanzando 75.535 org/mL, coincidiendo con el mes de mayor precipitación. *Microcystis aeruginosa* fue identificada como una cianobacteria potencialmente tóxica. Los valores de nitrógeno y fósforo total son elevados en comparación con otros ecosistemas lénticos de la región. El índice sapróbico y el índice de contaminación orgánica confirman la alta contaminación del lago San Pablo, el cual se clasifica como eutrófico.

**Palabras clave:** léntico, microalgas, cianobacterias, calidad de agua, eutrófico.

### Abstract

The objective of this research was to assess the phytoplankton diversity of San Pablo Lake and, based on its composition, determine its current trophic status. Samples were collected from May to August 2023 to account for seasonal variations. Taxonomic identification and photographic records were obtained using an inverted microscope equipped with a camera. A total of 77 species of microalgae and cyanobacteria, belonging to eight phyla, were identified. The most representative groups were Heterokontophyta (31 % of total species), followed by Chlorophyta (25%) and Charophyta (17 %). Cell density peaked in May, reaching 75,535 org/mL, coinciding with the highest rainfall levels. *Microcystis aeruginosa*, a potentially toxic cyanobacterium, was detected. Nitrogen and total phosphorus levels were elevated compared to other lentic ecosystems in the region. The saprobic index and organic pollution index confirm significant contamination and high organic pollution in San Pablo Lake, classifying it as eutrophic.

**Keywords:** lentic, microalgae, cyanobacteria, water quality, eutrophic.



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Mateo Dávila-Játiva

Recibido /  
Received:  
17/07/2024

Aceptado /  
Accepted:  
10/04/2024

Publicado en línea /  
Published online:  
15/04/2025

## INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas acuáticos lénticos constituyen un recurso natural muy importante a nivel científico, estético, cultural y económico, además de ser esenciales para la provisión de agua en la región. En Ecuador se estima que existe un volumen de 376 km<sup>3</sup> anuales de agua dulce en los cuerpos de agua superficiales gracias a factores topográficos y meteorológicos que influyen sobre la precipitación [1,2,3]. Además, los lagos y lagunas albergan altos niveles de biodiversidad, ya que son hábitat de un extenso número de organismos pertenecientes a diferentes comunidades biológicas como aves, mamíferos, plantas acuáticas, peces y organismos acuáticos como macroinvertebrados, microcrustáceos, zooplancton y fitoplancton [4].

En los últimos años, este tipo de ecosistema se ha visto fuertemente amenazado por una variedad de factores antrópicos como la intensificación del uso de la tierra, vertidos de aguas residuales e industriales, ganadería y uso de agua [5, 6]. En Ecuador, Aguirre et al. [7] mencionan que los ecosistemas acuáticos ecuatorianos están sometidos a una fuerte presión antrópica debido al crecimiento poblacional y al uso de tecnologías para el aprovechamiento de los recursos naturales.

La eutrofización es una de las consecuencias más evidentes en los últimos años, producto de la contaminación en los ecosistemas lénticos ecuatorianos por actividades antrópicas como ganadería, agricultura, vertido de aguas residuales y crecimiento poblacional. Este proceso genera un enriquecimiento excesivo de nutrientes en el agua, principalmente nitrógeno y fósforo, que ingresan directa o indirectamente a través de la escorrentía [8, 9].

El proceso eutrófico depende de la proporción de nitrógeno y fósforo en el cuerpo de agua. El desequilibrio de estos nutrientes va a alterar las características físicas y químicas originales del ecosistema [10], provocando un aumento descontrolado de la biomasa de microalgas y cianobacterias, así como condiciones anóxicas dentro del agua. Esto amenaza la integridad y diversidad de diferentes especies de peces, aves y mamíferos, además de afectar los servicios ecosistémicos y el valor estético de ríos, riachuelos, arroyos y otros sistemas fluviales [11, 12].

En este sentido, en el campo limnológico, el fitoplancton, que representa la base de la cadena trófica al ser productor primario [13, 14], ha adquirido gran importancia para caracterizar los sistemas acuáticos continentales, debido a que muchos de ellos son sensibles a cambios que ocurren en el agua [15]. Se utilizan como bioindicadores de la calidad del agua, ya que miden y cuantifican la magnitud del estrés y la respuesta ecológica al daño causado a un ecosistema, a través de cambios en la composición y distribución de la comunidad fitoplanctónica y de las especies sensibles [16, 17].

El lago San Pablo se encuentra ubicado en la provincia de Imbabura cerca de la ciudad de Otavalo. Posee una superficie de 6,7 km<sup>2</sup>, con una profundidad media de 24,5 m [18]. La vegetación natural en los alrededores del lago casi ha desaparecido por completo, y ha sido reemplazada por campos agrícolas, ganado y una población humana de aproximadamente 20 000 habitantes que se establecieron allí [19]. Todos estos factores crean una fuerte presión sobre el suelo y el agua, intensificando el riesgo de erosión.



Según Casallas [20], el lago San Pablo presenta problemas de eutrofización debido a la directa e indirecta entrada de aguas y residuos sólidos con un alto contenido de nutrientes y otras sustancias. Casallas y Gunkel [18] también indican que la eutrofización del lago es consecuencia de las descargas de aguas residuales domésticas, la agricultura intensiva, la agroindustria (uso de pesticidas, fungicidas, etc.) y la ganadería. Estas actividades, desarrolladas en la zona litoral del lago no solo aportan nutrientes, sino también Gérmenes, lo que agrava la contaminación del ecosistema.

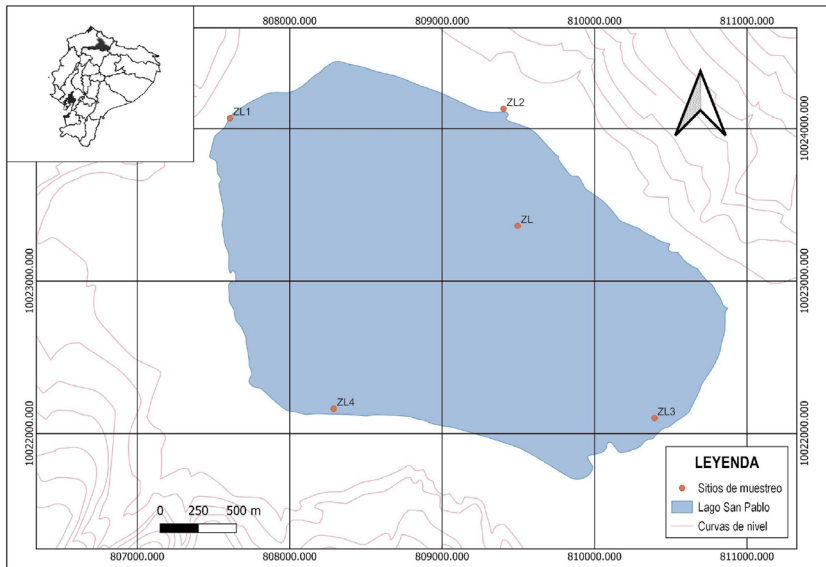
De los pocos estudios limnológicos realizados en el lago San Pablo se pueden destacar los de Gunkel [21], Gunkel y Casallas [22] y Casallas [20] que establecen el estado de las comunidades biológicas como el fitoplancton, donde el número de especies es bajo. Se reporta la dominancia de clorofitas y diatomeas con especies comunes como *Scenedesmus linearis*, *Pediastrum boryanum* var. *boryanum* y *Aulacoseira granulada*. Adicionalmente se reporta la presencia de *Microcystis aeruginosa*, cianobacteria potencialmente tóxica. Finalmente, se estudia la relación de las variables físico-químicas y biológicas catalogando al lago como altamente eutrófico por los elevados niveles de fósforo.

En este sentido, el objetivo de esta investigación fue analizar la diversidad y abundancia actual del fitoplancton en el lago San Pablo para determinar el estado trófico de sus aguas y comprender la dinámica de la población.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El Lago San Pablo se encuentra ubicado a 2 666 m.s.n.m. en la provincia de Imbabura a 7,1 km de la ciudad de Otavalo (Figura 1). Posee una superficie de 6,7 km<sup>2</sup>, una profundidad máxima de 35,2 m y una profundidad media de 24,5 m; convirtiéndolo en el lago más grande del país [21]. Posee forma circular con orillas de pendiente ligeramente pronunciada. La superficie del espejo de agua es de 6,68 km<sup>2</sup> y el tiempo de residencia de las aguas en el lago ha sido estimado en 3,2 años [23, 24]. La vegetación acuática en los diferentes estratos del lago está dominada por *Scirpus californicus*, *Myriophyllum quitense*, *Elodea canadensis*, *Ceratophyllum demersum* y *Potamogeton pectinatus* [19].



**Figura 1.** Ubicación geográfica del lago San Pablo, provincia de Imbabura. Mapa elaborado por: Andrés Arévalo.

## RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE MUESTRAS

Se establecieron cinco sitios de muestreo en el lago San Pablo, de los cuales, cuatro corresponden a sitios con focos de contaminación en la zona litoral y uno a la zona limnética del cuerpo de agua (Tabla 1). Los muestreos se realizaron una vez al mes en horas de la mañana, durante un periodo de cuatro meses (mayo, junio, julio y agosto) del año 2023. En cada uno de los sitios de estudio se tomaron dos muestras, tanto para el análisis cualitativo como para el cuantitativo. Para el análisis cualitativo se obtuvieron muestras mediante una red de arrastre de fitoplancton de 24  $\mu\text{m}$  de porosidad y almacenadas en frascos de vidrio color ámbar de 100 mL de capacidad. Para el análisis cuantitativo y análisis físico-químico se tomaron muestras de agua a medio metro de profundidad usando una botella tipo Van Dorn. Posteriormente, las muestras para análisis biológico fueron preservadas con solución de Transeau compuesta por agua destilada, alcohol al 96 % y formaldehído en proporción 6:3:1 [25].

**Tabla 1.** Ubicación geográfica de los sitios de muestreo establecidos en el lago San Pablo.

Código	Sitio de muestreo	Sector	Coordenadas	
			Latitud	Longitud
ZL1	Zona litoral 1	Sector Pucará Bajo, Parroquia Eugenio Espejo	0,217511	-78,236667
ZL2	Zona litoral 2	Comunidad Chilcal, Parroquia Eugenio Espejo	0,218056	-78,220556
ZL3	Zona litoral 3	Localizada entre la cooperativa Justicia Social y San Roque	0,199722	-78,211667
ZL4	Zona litoral 4	Comunidad San Miguel, Hostería Puerto Lago, Parroquia San Rafael	0,211111	-78,219722
ZL	Zona limnética	Zona céntrica del lago	0,208611	-78,225833

El análisis cuantitativo se realizó en un microscopio invertido marca Carl Zeiss modelo AxioVert A1 con objetivos de 40x y 63x a través del software ZEN lite, siguiendo la técnica por campos que consiste en sedimentar las muestras en cámaras Utermöhl y realizar el recuento de los microorganismos mediante la observación en campos aleatorios [26]. El material de referencia utilizado para la identificación taxonómica fue: Komárek [27]; Sant'Anna et al. [28]; Coesel y Meesters [29]; Komárek y Zapomelová [30]; Bonilla [31]; Rai y Misra [32]; Rosini et al. [33]; Kim [34, 35, 36] y Bicudo y Menezes [25]; además de la revisión en la base de datos en línea Algaebase [37].

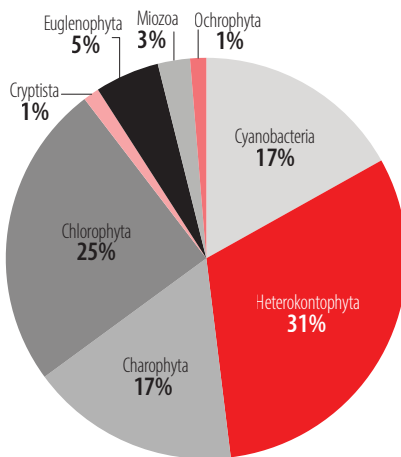
Las medidas de pH, conductividad, temperatura y sólidos disueltos totales (TDS) se tomaron *in situ* utilizando un multiparamétrico portátil de campo marca YSI EXO1, cuyos sensores fueron previamente calibrados. Los análisis de nitrógeno total (Nt), fósforo total (Pt), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) fueron realizados en el Laboratorio de Servicios Ambientales de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Central del Ecuador siguiendo los métodos: espectrofotométrico, colorimétrico, volumétrico, método oxidativo y colorimétrico respectivamente.

Los datos de precipitación fueron obtenidos del Sistema de Información Pública Agropecuaria [38].

Para evaluar la calidad del agua se empleó el índice sapróbico de Pantle y Buck [39] y el índice de polución orgánica de Palmer [40], en función de las especies de microalgas y cianobacterias presentes en el lago.

## RESULTADOS

Con base al análisis cualitativo de las muestras provenientes del lago San Pablo, se identificaron 77 especies pertenecientes a 8 phyla (Tabla 2). Los más representativos fueron las diatomeas (Heterokontophyta) con el 31 % del total de las especies; seguido de las algas verdes (Chlorophyta 25 % y Charophyta 17 %) y cianobacterias (Cyanobacteria) con el 17 %. Los phyla Euglenophyta, Miozoa, Cryptista y Ochrophyta aportaron con el 5, 3 % y 1 % de las especies respectivamente (Figura 2). Además, se identificaron dos especies de cianobacterias potencialmente tóxicas: *Dolichospermum* sp. y *Microcystis aeruginosa*.



**Figura 2.** Distribución porcentual (%) de la riqueza específica de fitoplancton en el lago San Pablo.  
 Figura elaborada por: Mabel Cadena.

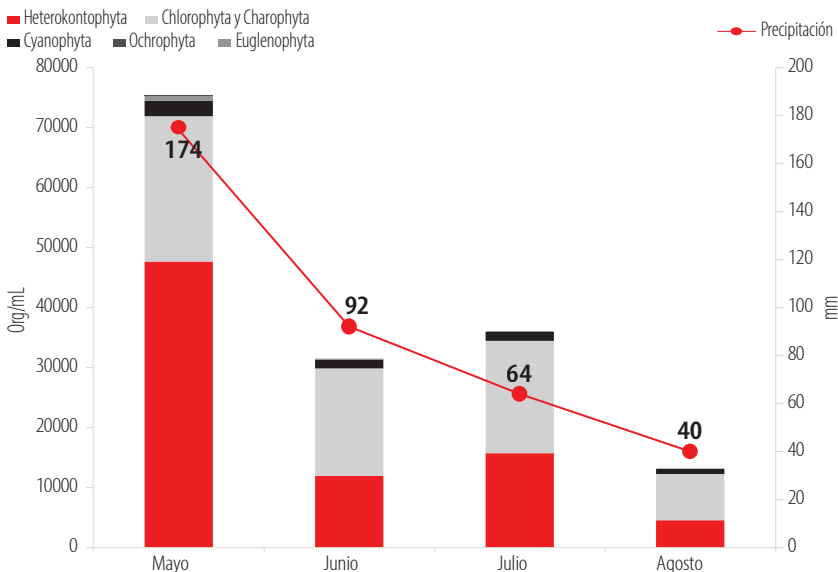
**Tabla 2.** Especies de fitoplancton presentes en el Lago San Pablo.

Phylum	Especie	Phylum	Especie
<b>CYANOBACTERIA</b>	<i>Anabaena</i> sp.	<b>CHAROPHYTA</b>	<i>Closterium acerosum</i>
	<i>Calothrix</i> sp.		<i>Closterium acutum</i>
	<i>Chroococcus</i> sp.		<i>Closterium diana</i>
	<i>Cylindrospermum</i> sp.		<i>Closterium glabile</i>
	<i>Dolichospermum</i> sp.		<i>Closterium kuetzingii</i>
	<i>Leptolyngbya</i> sp.		<i>Closterium moniliferum</i>
	<i>Lyngbya</i> sp.		<i>Closterium striolatum</i>
	<i>Merismopedia glauca</i>		<i>Closterium venus</i>
	<i>Microcystis aeruginosa</i>		<i>Cosmarium subspeciosum</i>
	<i>Oscillatoria</i> sp.		<i>Elakathrix</i> sp.
	<i>Phormidium</i> sp.		<i>Micrasterias laticeps</i>
<i>Pseudanabaena</i> sp.	<i>Micrasterias truncata</i>		
<i>Synechocystis</i> sp.	<i>Spirogyra</i> sp.		

Phylum	Especie	Phylum	Especie
<b>HETEROKONTOPHYTA</b>	<i>Amphipleura</i> sp.	<b>CHLOROPHYTA</b>	<i>Acutodesmus acuminatus</i>
	<i>Amphora</i> sp.		<i>Acutodesmus bernardii</i>
	<i>Aulacoseira</i> sp.		<i>Ankistrodesmus fusiformis</i>
	<i>Ceratoneis</i> sp.		<i>Ankistrodesmus spiralis</i>
	<i>Cooconeis placentula</i>		<i>Botryococcus braunii</i>
	<i>Cylindrotheca</i> sp.		<i>Chlamydomonas</i> sp.
	<i>Cymbella</i> sp.		<i>Coelastrum indicum</i>
	<i>Diploneis</i> sp.		<i>Coelastrum microporum</i>
	<i>Encyonema</i> sp.		<i>Desmodesmus communis</i>
	<i>Epithemia</i> sp.		<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>
	<i>Eunotia</i> sp.		<i>Eudorina elegans</i>
	<i>Gomphonema</i> sp.		<i>Monoraphidium contortum</i>
	<i>Gyrosigma</i> sp.		<i>Oocystis lacustris</i>
	<i>Melosira</i> sp.		<i>Oocystis naegelii</i>
	<i>Navicula</i> sp.		<i>Pandorina morum</i>
	<i>Nitzschia sigmoidea</i>		<i>Pediastrum dúplex</i>
	<i>Nitzschia</i> sp.		<i>Pseudopediastrum boryanum</i>
	<i>Pinnularia</i> sp.		<i>Planktosphaeria gelatinosa</i>
	<i>Rhoicosphenia</i> sp.		<i>Tetraëdron minimum</i>
	<i>Rhopalodia</i> sp.		<b>CRYPTISTA</b>
<i>Stauroneis</i> sp.	<b>EUGLENOPHYTA</b>	<i>Euglena</i> sp.	
<i>Surirella</i> sp.		<i>Lepocinclis</i> sp.	
<i>Synedra</i> sp.		<i>Phacus</i> sp.	
<i>Ulnaria</i> sp.		<i>Trachelomonas hispida</i>	
<b>MIOZOA</b>	<i>Ceratium</i> sp.	<b>OCHROPHYTA</b>	<i>Synura</i> sp.
	<i>Peridinium</i> sp.		

En cuanto al análisis cuantitativo del fitoplancton, en la figura 3 se puede apreciar que las mayores densidades celulares totales se registraron para el mes de mayo con 75.535 org/mL, mientras que los valores más bajos fueron registrados en el mes de agosto con un total de 13.162 org/mL. Las diatomeas alcanzaron las densidades celulares máximas durante

el mes de mayo con 47.666 org/mL, aportando con el 63 % a la abundancia total. Los meses de junio, julio y agosto fueron dominados por las algas verdes con el 57, 52 % y 58 % de la abundancia total respectivamente. Por otro lado, *Synura* sp. perteneciente al phyla Ochrophyta fue registrada únicamente en el mes de mayo con 72 org/mL. Además, podemos observar que las abundancias de los microorganismos siguen el patrón de descenso según los valores de la precipitación que van desde mayo (174 mm) y disminuye en el mes de agosto (40 mm).



**Figura 3.** Variación de abundancia fitoplanctónica y precipitación entre mayo y agosto de 2023 en el lago San Pablo. Figura elaborada por: Mabel Cadena.

De los valores de los parámetros físico-químicos medidos (tabla 3), se observa una tendencia alcalina en el pH, con un máximo de 8,6 en julio y agosto. La temperatura varió entre 17,7 °C en mayo y 19,6 °C en agosto. La mayor conductividad se registró en el mes de mayo con 298  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ . De igual manera, en agosto se obtuvieron los valores medios más altos de sólidos disueltos totales (147 ppm), nitrógeno total (1,8 mg/L), fósforo total (1,62 mg/L), DBO (11 mgO<sub>2</sub>/L) y DQO (23 mgO<sub>2</sub>/L), a pesar de la baja precipitación. Esto podría atribuirse al fuerte oleaje registrado el día del muestreo, generado por el viento, lo que provocó una gran cantidad de materia orgánica en suspensión y, en consecuencia, influyó directamente en los resultados de los análisis.

**Tabla 3.** Valores medios del potencial de hidrógeno (pH), temperatura (T), conductividad eléctrica (Cond), sólidos disueltos totales (TDS), nitrógeno total (Nt), fósforo total (Pt), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) en el lago San Pablo durante el período mayo-agosto de 2023.

Meses de muestreo	pH	T °C	Cond $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	TDS ppm	N t mg/L	P t mg/L	DBO $\text{mgO}_2/\text{L}$	DQO $\text{mgO}_2/\text{L}$
Mayo	7,9	17,7	298	147,6	1	0,1	5	8
Junio	8,1	18,3	286,8	143,4	2,4	0,1	5	8
Julio	8,6	18,7	284,6	144,6	1	0,88	5	15,6
Agosto	8,6	19,6	285	147	1,8	1,62	11	23

Finalmente, tomando en cuenta al componente taxonómico durante el periodo de estudio, se pudo estimar que el lago San Pablo se encuentra en estado eutrófico (Tabla 4), ya que el índice de Pantle y Buck expone que el sistema presenta contaminación fuerte, y el índice de polución orgánica de Palmer lo cataloga de acuerdo con la presencia de ciertas microalgas como un lago con alta polución orgánica.

**Tabla 4.** Estado trófico actual del Lago San Pablo con base al Índice sapróbico de Pantle y Buck e Índice de polución orgánica (OPI) de Palmer.

Índice	Valor	Interpretación
Pantle y Buck	2,51	Contaminación fuerte
OPI	32	Alta polución orgánica

## DISCUSIÓN

Con 77 géneros de microalgas y cianobacterias identificados, la composición actual de fitoplancton en el lago San Pablo es superior a lo reportado por Gunkel [21], Casallas y Gunkel [18] y Casallas [20] con 19, 27 y 32 especies respectivamente para el mismo cuerpo de agua; incluso superior a la composición taxonómica de algunos lagos del Parque Nacional Cajas [41, 42], Yahuarcocha [43, 44] y otros lagos de los Andes ecuatorianos ubicados sobre los 3 863 m.s.n.m. [45].

Los taxones dominantes Heterokontophyta, Chlorophyta y Charophyta son grupos de amplia distribución en lagos tropicales con diferente grado trófico y tolerantes a diferentes cambios ambientales que se producen en su hábitat [46]. Especies como *Cryptomonas* sp., *Euglena* sp., *Pediastrum boryanum*, *Oocystis naegelii*, *Planktosphaeria gelatinosa*, *Coelastrum microporum*, *Peridinium* sp. y *Nitzschia* sp. han sido reportados por Gunkel [21], Casallas y Gunkel [18] y Gunkel y Casallas [22] en sus estudios limnológicos en este sistema lacustre.

Las cianobacterias *Chroococcus* sp. y *Microcystis aeruginosa* fueron los géneros dominantes en términos cuantitativos debido a su capacidad para competir por nitrógeno. Sus adaptaciones metabólicas especiales y su eficiencia en el almacenamiento de nitrógeno les permiten prosperar en ambientes con alta disponibilidad de este nutriente [47]. Sin



embargo, son menos eficientes en la competencia por fósforo en comparación con las diatomeas y las algas verdes [48]. Además, las cianobacterias constituyen una seria preocupación, ya que pueden provocar anoxia en el agua del lago, muerte de peces y otros organismos acuáticos, además de reducir el valor estético de las aguas recreacionales [49].

La cianobacteria *Microcystis aeruginosa* tiene la capacidad de producir cianotoxinas como microcistinas que pueden tener un efecto perjudicial para la salud humana, la fauna terrestre y acuática por sus efectos hepatotóxicos, neurotóxicos, genotóxicos, gastrointestinales y dérmicos [50, 51]. A pesar de que el lago San Pablo presenta las condiciones para el desarrollo de cianobacterias debido al estado trófico, hay que puntualizar que la toxicidad va a depender de la presencia de genes involucrados en la síntesis de microcistinas, por lo que pueden o no existir poblaciones tóxicas en una floración de cianobacterias de ser el caso [52]. Esto daría lugar a realizar futuros estudios moleculares sobre si las poblaciones de *Microcystis aeruginosa* registradas en el lago San Pablo tienen o no la capacidad de producir toxinas.

Los valores de las variables físico-químicas obtenidas en cada mes de muestreo reafirman las condiciones ambientales que influyen en la composición de las comunidades de fitoplancton reportadas en el presente estudio. Por ejemplo, Mpawenayo [53] menciona de qué manera los parámetros del agua como pH, conductividad, nitrógeno, sílice y temperatura intervienen en la abundancia de algas verdes y diatomeas. De la misma manera Pham [54] y Godoy et al. [55] indican que la temperatura incide sobre el crecimiento y desarrollo de las comunidades de cianobacterias especialmente a temperaturas superiores a los 23°C y sobre la producción de cianotoxinas.

Los resultados obtenidos de las variables físico-químicas fueron similares a las reportadas por Casallas y Gunkel [18] y Casallas [20] para el mismo cuerpo de agua. Los valores de conductividad indican procesos de mineralización deficientes, ya que los nutrientes, al no descomponerse adecuadamente, dan como resultado una baja concentración de iones. Los valores de conductividad fueron inferiores comparados con otras lagunas del país como Cuicocha [56], Colta [57] y Yahuarcocha [44]. En cuanto a las concentraciones de nitrógeno y fósforo total, estos son comunes para lagos de aguas mesotróficas y pueden ser considerados altos para un lago situado por encima de 2 000 m s. n. m., incluso si se lo compara con otros lagos de alta montaña como el lago Siscunsi, La Calderona, La Tota, Los Colorados y El Encanto de Colombia, donde las concentraciones del nitrógeno total fueron menores con valores entre 0,2 y 0,5 mg/l [46]. Además, los valores de nitrógeno pueden relacionarse con la presencia de materia orgánica producto del vertido de aguas de origen antrópico, ya sean industriales o domésticas y también con la entrada de nutrientes a través de la escorrentía por el uso de fertilizantes en cultivos ubicados en zonas litorales del lago [19].

En cuanto al índice sapróbico de Pantle y Buck y el índice de polución orgánica de Palmer, los resultados obtenidos están relacionados con la presión antrópica que sufre el lago San Pablo que ha sido catalogado en varios estudios como un lago eutrófico [19, 58, 59]. La intensificación de la agricultura en los últimos años parece ser la principal causa de eutrofización no solo en el lago San Pablo, sino también en lagos de todo el mundo debido a la transferencia de nutrientes, principalmente fósforo [60]. En Estados Unidos se estima que entre el 25 % y 75 % del fósforo que forma parte de los fertilizantes



usados en la agricultura llegan al medio ambiente [61]. En este sentido, el lago San Pablo se ve gravemente afectado considerando que el 30,41 % de la cuenca está destinada a cultivos de maíz, trigo, cebada, árboles frutales, leguminosas, entre otros [62].

Finalmente, aunque los nutrientes son esenciales para las redes tróficas acuáticas, el aumento en la entrada de fósforo y nitrógeno, producto del crecimiento demográfico, supera sus efectos positivos y afecta la calidad del agua en los ecosistemas acuáticos [63, 64]. Además, la comparación de las variables físico-químicas y biológicas analizadas en esta investigación con estudios previos permite concluir que el lago San Pablo está experimentando un proceso de eutrofización, creando un ambiente propicio para el crecimiento de comunidades de cianobacterias que pueden afectar los servicios ecosistémicos del lago.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Nelson Gallo por sus aportes y comentarios en la redacción del presente manuscrito. También agradecen a Gabriela Echeverría, por su ayuda en la logística, guía y toma de muestras en el lago San Pablo y sus alrededores.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Andrés Arévalo concibió la investigación y realizó la fase de campo junto a Mabel Cadena y Diana Ontaneda. Andrés Arévalo y Diana Ontaneda realizaron el análisis cualitativo y cuantitativo de las muestras. Mabel Cadena contribuyó en la redacción del manuscrito.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de intereses con relación a la publicación de este artículo. Todos los autores han leído y aprobado el manuscrito final y consienten en su publicación.

## REFERENCIAS

- [1] Limburg, K. E. (2009). Aquatic ecosystem services in G. E. Likens (ed.). *Encyclopedia of Inland Waters* (pp.25-30). Oxford: Academic Press.
- [2] Yáñez, L., Franco, P., Bastidas, W., & Córdova, V. (2017). Resumen del plan nacional de gestión integrada e integral de los recursos hídricos y de las cuencas y microcuencas hidrográficas de Ecuador. *AQUA-LAC*, 9(2), 124-132.
- [3] Naranjo-Silva, S. (2024). A hydropower development perspective in Ecuador: past, present, and future. *La Granja*, 39(1), 63-77. <https://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.04>
- [4] Heino, J., Alahuhta, J., Bini, L. M., Cai, Y., Heiskanen, A. S., Hellsten, S., Kortelainen, P., Kotamäki, N., Tolonen, K. T., Vihervaara, P., Vilmi, A., & Angeler, D. G. (2021). Lakes in the era of global change: Moving beyond single-lake thinking in maintaining biodiversity and ecosystem services. *Biological Reviews*, 96(1), 89-106. <https://doi.org/10.1111/brv.12647>
- [5] Smol, J. P. (2019). Under the radar: Long-term perspectives on ecological changes in lakes. *Proceedings of the Royal Society B*, 286. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.0834>
- [6] Birk, S., Chapman, D., Carvalho, L., Spears, B. M., Andersen, H. E., Argillier, C., Auer, S., Baattrup-Pedersen, A., Banin, L., Beklioglu, M., Bondar-Kunze, E., Borja, A., Branco, P., Bucak, T., Buijse, A. D., Cardoso, A. C., Couture, R. M., Cremona, F., Zwart, D., ... Hering, D. (2020). Impacts of multiple stressors on freshwater biota across spatial scales and ecosystems. *Nature Ecology and Evolution*, 4(8), 1060–1068. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1216-4>
- [7] Aguirre, W. E., Alvarez-Miele, G., Anaguano-Yancha, F., Burgos Morán, R., Cucalón, R. V., Escobar-Camacho, D., Jácome-Negrete, I., Jiménez Prado, P., Laaz, E., Miranda-Troya, K., Navarrete-Amaya, R., Nugra Salazar, F., Revelo, W., Rivadeneira, J. F., Valdiviezo Rivera, J., & Zárate Hugo, E. (2021). Conservation threats and future prospects for the freshwater fishes of Ecuador: A hotspot of Neotropical fish diversity. *Journal of Fish Biology*, 99(4), 1158-1189. <https://doi.org/10.1111/jfb.14844>
- [8] Lampert, W., & Sommer, U. (2007). *Limnology: the ecology of lakes and streams*. Oxford university press.
- [9] Howarth, R., & Paerl, H. W. (2008). Coastal marine eutrophication: Control of both nitrogen and phosphorus is necessary. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(49), 103. <https://doi.org/10.1073/pnas.0807266106>
- [10] Lyu, J. Q., Luo, P. P., Mo, S. H., Zhou, M. M., Shen, B. & Nover, D. (2019). A quantitative assessment of hydrological responses to climate change and human activities at spatiotemporal within a typical catchment on the Loess Plateau, China. *Quaternary International*, 527, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.03.027>
- [11] Withers, P., Neal, C., Jarvie, H., & Doody, D. (2014). Agriculture and Eutrophication: Where do we go from here?. *Sustainability*, 6(9). <https://doi.org/10.3390/su6095853>
- [12] Liang, Z., Xu, Y., Qiu, Q., Liu, Y., Lu, W., & Wagner, T. (2021). A framework to develop joint nutrient criteria for lake eutrophication management in eutrophic lakes. *Journal of Hydrology*, 594. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125883>
- [13] Wetzel, R. G. (1981). *Limnología*. Ediciones Omega.
- [14] Bravo, E. (2014). *La Biodiversidad en el Ecuador*. Editorial Universitaria Abya-Yala.
- [15] Ptacnik, R., Solimini, A.G., & Brettum, P. (2009). Performance of a new phytoplankton composition metric along a eutrophication gradient in Nordic lakes. *Hydrobiologia* 633, 75–82. <https://doi.org/10.1007/s10750-009-9870-1>
- [16] De la Lanza-Espino, G., Hernández, P. S. & Carvajal, P. J. L. (2000). *Organismos indicadores de la calidad del agua y de la contaminación (bioindicadores)*. Editorial Plaza y Valdés.
- [17] Vélez-Azañero, A., Lozano, S., & Cáceres-Torres, K. (2016). Diversidad de fitoplancton como indicador de calidad de agua en la cuenca baja del río Lurín, Lima, Perú. *Ecología Aplicada*, 15(2), 69-79. <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v15i2.745>
- [18] Casallas, J., & Gunkel, G. (2001). Algunos aspectos limnológicos de un lago altoandino: El lago San Pablo, Ecuador. *Limnetica*, 20(2), 215-232. <https://www.limnetica.info/documentos/limnetica/limnetica-20-2-p-215.pdf>

- [19] Terneus Jácome, E. (2017). Vegetación acuática y estado trófico de las lagunas andinas de San Pablo y Yahuarcocha, provincia de Imbabura, Ecuador. *Revista Ecuatoriana De Medicina Y Ciencias Biológicas*, 35(1-2), 121-131. <https://doi.org/10.26807/remcb.v35i1-2.255>
- [20] Casallas, J. (2005). *Investigaciones limnológicas en el lago San Pablo, un lago de alta montaña en Ecuador*. [Tesis de doctorado, Technischen Universität Berlin]. <https://depositonce.tu-berlin.de/items/0c573865-95df-4285-8fd4-4e624409a6e4>
- [21] Gunkel, G. (2000). Limnology of an equatorial high mountain lake in Ecuador, Lago San Pablo. *Limnologica*, 30(2), 113-120. [https://doi.org/10.1016/S0075-9511\(00\)80005-5](https://doi.org/10.1016/S0075-9511(00)80005-5)
- [22] Gunkel, G., & Casallas, J. (2002). Limnological of an equatorial high mountain lake, Lago San Pablo, Ecuador: Limitation of lake productivity by deep diurnal mixing. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 28(4). <https://doi.org/10.1080/03680770.2001.11901941>
- [23] Galárraga, E., Zevallos, O., Toledo, P., Criollo, C., Robelly, N. & Ruales, J. (1992). *Estudio para la recuperación y protección de la zona turística de los lagos de la provincia de Imbabura con fines de equilibrio ecológico y promoción turística*. Ministerio de Relaciones Exteriores del Ecuador.
- [24] Gunkel, G. (2003). Limnología de un lago tropical de alta montaña, en Ecuador: Características de los sedimentos y tasa de sedimentación. *Revista de Biología Tropical*, 51(2), 381-390. [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0034-77442003000200010&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0034-77442003000200010&script=sci_arttext)
- [25] Bicudo, C. E. D. M., & Menezes, M. (2017). *Gêneros de algas de águas continentais: Chave para identificação e descrições*. Livraria RiMa Editora.
- [26] Gómez, N., Rondón, J. C. D., Giorgi, A., i Padró, H. G., Mateo, P., & i Cortés, S. S. (2009). La biota de los ríos: los microorganismos autótrofos. En *Conceptos y técnicas en ecología fluvial* (pp. 219-242). Fundación BBVA.
- [27] Komárek, J. (2005). The modern classification of cyanoprokaryotes (cyanobacteria). *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 34(3).
- [28] Sant'Anna, C., Azevedo, M. T., Aguijaro, L., Carvalho, M. C., & Souza, R. C. (Eds.). (2005). *Manual ilustrado para identificação y conteo de cianobacterias planctónicas de aguas continentales brasileiras*. Interciencia.
- [29] Coesel, P. F. M., & Meesters, J. K. (2007). *Desmids of the Lowlands: Mesotaeniaceae and desmidiaceae of the european lowlands*. KNNV Publishing: Zeist.
- [30] Komárek, J., & Zapomělová, E. (2007). Planktic morphospecies of the cyanobacterial genus Anabaena= subg. Dolichospermum—1. part: Coiled types. *Fottea*, 7(1), 1-31. <http://www.fottea.cz/cechphycolgy.cz/pdfs/fot/2007/01/01.pdf>
- [31] Bonilla, S. (Ed). (2009). *Cianobacterias planctónicas del Uruguay: Manual para la identificación y medidas de gestión*. Programa Hidrológico Internacional.
- [32] Rai, S. K., & Misra, P. K. (2012). Taxonomy and diversity of genus Pediastrum Meyen (Chlorophyceae, Algae) in east Nepal. *Our Nature*, 10(1), 167-175. <https://doi.org/10.3126/on.v10i1.7779>
- [33] Rosini, E. F., Sant'Anna, C. L., & Tucci, A. (2013). Cyanobacteria de pesqueiros da região metropolitana de São Paulo, Brasil. *Rodriguésia*, 64(2), 399-417. <https://doi.org/10.1590/S2175-78602013000200015>
- [34] Kim, H. S. (2013). New records of fresh-water green algae (Chlorophytes) from Korea. *Journal of Ecology and Environment*, 36(4), 303-314.
- [35] Kim, Y. J. (2013). Taxonomic and ecological study of the families Hydrodictyaceae and Coelastraceae, order Chlorococcales, and Class Chlorophyceae in Korea. *Journal of Ecology and Environment*, 36(4), 421-437. <https://doi.org/10.5141/ecoenv.2013.421>
- [36] Kim, Y. J. (2015). New records of genus Scenedesmus (Chlorophyceae) found in Korea. *Journal of Ecology and Environment*, 38(2), 213-227. <https://doi.org/10.5141/ecoenv.2015.022>
- [37] Guiry, M. D., & Guiry, G. M. (2025). *AlgaeBase. World-wide electronic publication*. University of Galway. <https://www.algaebase.org>
- [38] Sistema de Información Pública Agropecuaria. (s.f.). *Boletín Nacional Precipitación y Temperatura 2023*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. <https://sipa.agricultura.gob.ec/>

- [39] Pantle, R., & Buck, H. (1955). Die biologisch Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse. *Gas-u. Wasserfach*, 96, 1-64.
- [40] Palmer, C. M. (1969). A composite rating of algae tolerating organic pollution. *Journal of Phycology*, 5(1), 78-82. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.1969.tb02581.x>
- [41] Van Colen, W. P., Mosquera, M., Vanderstukken, K., Goiris, M. C., Carrasco, E., Decaestecker, M., Leon-TamarizAlonso F., & Muylaer, K. (2017). Limnology and trophic status of glacial lakes in the tropical Andes (Cajas National Park, Ecuador). *Freshwater Biology* 62(3), 458-473. <https://doi.org/10.1111/fwb.12878>
- [42] Van Colen, W., Mosquera, P. V., Hampel, H., & Muylaert, K. (2018). Link between cattle and the trophic status of tropical high mountain lakes in páramo grasslands in Ecuador. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 23(4), 303-311. <https://doi.org/10.1111/lre.12237>
- [43] Maridueña, A., Chalén, N., Coello, D., Cajas, J., Solís, P., Aguilar, F., & Elías, E. (2011). Mortandad de peces en la Laguna de Yahuarcocha, cantón Ibarra, provincia de Imbabura. Febrero 2003. *Boletín especial*, 2(1).
- [44] Cabezas, M. D. L. G., Steinitz-Kannan, M., & Vilarrúbia, T. V. (2023). Floración de Planktothrix agardhii en Yahuarcocha, una laguna altoandina hipereutrófica. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas*, 44(1), 1-14. <https://doi.org/10.26807/remcb.v44i1.958>
- [45] Barta, B., Mouillet, C., Espinosa, R., Andino, P., Jacobsen, D., & Christoffersen, K. (2017). Glacial-fed and páramo lake ecosystems in the tropical high Andes. *Hydrobiologia*, 813, 19-32. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3428-4>
- [46] Sierra, Y. V. H., Ramos, A. P., & Riaño, N. A. (2021). Estructura del fitoplancton de lagos andinos ubicados en diferente rango altitudinal. *Intropica: Revista del Instituto de Investigaciones Tropicales*, 16(2), 153-167. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8464162>
- [47] Wang, Z., Zhang, Y., Huang, S., Peng, C., Hao, Z., & Li, D. (2019). Nitrogen limitation significantly reduces the competitive advantage of toxic *Microcystis* at high light conditions. *Chemosphere*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124508>
- [48] Fujimoto, N., Sudo, R., Sugiura, N. & Inamori, Y. (1997). Nutrient-limited growth of *Microcystis aeruginosa* and *Phormidium tenue* and competition under various N:P supply ratios and temperatura. *Limnology and Oceanography*, 42(2), 250-256. <https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.2.0250>
- [49] Okechukwu, I. O., & Ugwumba, A. O. (2009). Cyanobacteria abundance and its relationship to water quality in the Mid-Cross River floodplain, Nigeria. *Revista de Biología Tropical*, 57(1-2), 33-43. [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-77442009000100004](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442009000100004)
- [50] Wang, Q., Xiao, G., Chen, G., Du, H., Wang, L., Guo, D., & Hu, T. (2018). Toxic effect of microcystin-LR on blood vessel development. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 100(8-10), 373-752. <https://doi.org/10.1080/02772248.2019.1578963>
- [51] Welten, R. D., Meneely, J. P., & Elliott, C. T. (2020). A comparative review of the effect of microcystin-LR on the proteome. *Exposure and Health*, 12, 111-129. <https://doi.org/10.1007/s12403-019-00303-1>
- [52] Lepillanca, F., de la Escalera, G.M., Bordet, F., O'Farrell, I. & Piccini, C. (2018). Detección de poblaciones tóxicas de *Microcystis* spp. con distintas preferencias ambientales. Estudio de caso: embalse de Salto Grande. *Innotec*, 16. <https://doi.org/10.26461/16.06>
- [53] Mpawenayo, B., Cocquyt, C., & Nindorera, A. (2005). Diatoms (*Bacillariophyta*) and other algae from the hot springs of Burundi (Central Africa) in relation with the physical and chemical characteristics of the water. *Belgian Journal of Botany*, 138(2), 152-164. <http://hdl.handle.net/1854/LU-334647>
- [54] Pham, T. L., Dao, T. S., Tran, N. D., Nimptsch, J., Wiegand, C., & Motoo, U. (2017). Influence of environmental factors on cyanobacterial biomass and microcystin concentration in the Dau Tieng Reservoir, a tropical eutrophic water body in Vietnam. *In Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, 53. <https://doi.org/10.1051/limn/2016038>
- [55] Godoy, R. F. B., Trevisan, E., Battistelli, A. A., Crisigiovanni, E. L., do Nascimento, E. A., & da Fonseca Machado, A. L. (2023). Does water temperature influence in microcystin production? A case study of Billings Reservoir, São Paulo, Brazil. *Journal of Contaminant Hydrology*, 255. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104164>
- [56] Gunkel, G., & Beulker, C. (2009). Limnology of the Crater Lake Cuicocha, Ecuador, a cold water tropical lake. *International Review of Hydrobiology*, 94(1). <https://doi.org/10.1002/iroh.200811071>



- [57] Escobar Arrieta, S., Albuja, A., & Andueza Leal, F. D. (2021). Calidad fisicoquímica del agua de la laguna Colta. Chimborazo. Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 11(1), 76-81. <https://doi.org/10.29166/revfig.v11i1.3135>
- [58] Guevara, E. A., Santander, T., Espinosa, R., & Graham, C. H. (2021). Aquatic bird communities in Andean lakes of Ecuador are increasingly dissimilar over time. *Ecological Indicators*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107044>
- [59] Ballesteros, I., Cruz, S. D. L., Rojas, M., Salazar, G., Martínez-Fresneda, M., & Castillejo, P. (2022). Screening of cyanotoxin producing genes in Ecuadorian freshwater systems. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 34. <https://doi.org/10.1590/S2179-975X2122>
- [60] Moss, B., Jeppesen, E., Sondergaard, M., Lauridsen, T. L. & Liu, Z. W. (2013). Nitrogen, macrophytes, shallow lakes and nutrient limitation: Resolution of a current controversy? *Hydrobiologia*, 710(1), 3-21. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1033-0>
- [61] Sutton, M. A., Bleeker, A., Howard, C. M., Bekunda, M., Grizzetti, B., de Vries, W., van Grinsven, H. J. M., Abrol, Y. P., Adhya, T. K., Billen, G., Davidson, E. A., Datta, A., Diaz, R., Erismann, J. W., Liu, X. J., Oenema, O., Palm, C., Raghuram, N., Reis, S., ... & Zhang, Y (2013). *Our nutrient world. The challenge to produce more food & energy with less pollution*. Centre for Ecology & Hydrology (CEH). <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/500700/1/N500700BK.pdf>
- [62] Manosalvas, D. (2017). *Evaluación de los impactos ambientales generados por las actividades turísticas y agrícolas localizadas en las riberas del lago San Pablo*. [Tesis de grado, Universidad Tecnológica Equinoccial]. <https://repositorio.ute.edu.ec/entities/publication/8387dbf0-84a7-4b08-9316-b64d1ccc8f6f>
- [63] Glibert, P. M. (2017). Eutrophication, harmful algae and biodiversity - Challenging paradigms in a world of complex nutrient changes. *Marine Pollution Bulletin*, 124(2), 591-606. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.04.027>
- [64] Bachmann, R. W., Jones, B. L., Fox, D. D., Hoyer, M., Bull, L. A. & Canfield, D. E. (1996). Relations between trophic state indicators and fish in Florida (USA) lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 53(4), 842-855. <https://doi.org/10.1139/f95-236>

## Optimization of sourness and flavor in orange-flavored gummy candies using a simplex-lattice mixture design implemented with R

Lizbeth Chávez-Reyes<sup>1</sup>, Laura García-Curiel<sup>2</sup>, Jesús Guadalupe Pérez-Flores<sup>1,2\*</sup>, Emmanuel Pérez-Escalante<sup>1</sup>, Elizabeth Contreras-López<sup>1</sup>, Lizbeth Anahí Portillo-Torres<sup>1</sup>, Luis Guillermo González-Olivares<sup>1</sup>, Carlos Ángel-Jijón<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Área Académica de Química, Mineral de la Reforma, México.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias de la Salud, Área Académica de Enfermería, San Agustín Tlaxiaca, México.

\*Corresponding author: Jesús Guadalupe Pérez-Flores, email: [jesus\\_perez@uaeh.edu.mx](mailto:jesus_perez@uaeh.edu.mx)

## Optimización de la acidez y del aroma en caramelos de goma con sabor a naranja utilizando un diseño de mezclas simplex-lattice implementado con R

### Abstract

Acidulants are crucial for enhancing and balancing the flavor profiles of confectionery products, such as gummy candies, ensuring an optimal sensory experience. This study aimed to develop an R script using the simplex-lattice mixture design to optimize the sourness and flavor levels and the combined response of these attributes for orange-flavored gummy candies, demonstrating its application in improving the sensory qualities of confectionery products. The gummy candies were prepared according to previous research, incorporating citric, malic, and fumaric acids based on the experimental design. The R scripts were provided and uploaded to the GitLab platform for download and analysis (<https://gitlab.com/FoodChem-DataSci-Lab/orange-flavored-gummy-candies>). The effects of these acids on sourness and flavor were assessed using a 5-point hedonic scale by 30 trained judges. The data were analyzed with R, resulting in mathematical models for the acids' individual effects, interactions, and combined responses. Effect (Piepel direction) and contour plots were generated as well. The optimal mixture was determined to be 4.95 g of citric acid, 4.65 g of malic acid, and 5.40 g of fumaric acid, achieving an optimal combined response value of 107.14. In conclusion, balancing these three acids is critical to optimizing sourness and flavor levels in orange-flavored gummy candies. This study provided a valuable methodology for formulating confectionery products with enhanced sensory profiles. It demonstrated the capability of R to address complex problems in both the confectionery industry and academia, emphasizing its importance as an analytical tool for developing products with improved sensory characteristics.

**Keywords:** Gummy candies, acidulants, Simplex-lattice mixture design, hedonic scale, R programming

### Resumen

Los acidulantes son cruciales para mejorar y equilibrar los perfiles de sabor de los productos de confitería, como los caramelos de goma, asegurando una experiencia sensorial óptima. Este estudio tuvo como objetivo desarrollar un script en R utilizando el diseño de mezclas



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Sebastian Ponce

Recibido /  
Received:  
05/08/2024

Aceptado /  
Accepted:  
13/09/2024

Publicado en línea /  
Published online:  
15/04/2025



simplex-lattice para optimizar los niveles de acidez y aroma y la respuesta combinada de estos atributos para caramelos de goma con sabor a naranja, demostrando su aplicación para mejorar las cualidades sensoriales de los productos de confitería. Los caramelos de goma se prepararon según investigaciones previas, incorporando ácidos cítrico, málico y fumárico con base en el diseño experimental. Los scripts en R se proporcionaron y cargaron en la plataforma GitLab para su descarga y análisis (<https://gitlab.com/FoodChem-DataSci-Lab/orange-flavored-gummy-candies>). Treinta jueces capacitados evaluaron los efectos de estos ácidos sobre la acidez y el aroma utilizando una escala hedónica de 5 puntos. Los datos se analizaron con R, lo que dio como resultado modelos matemáticos para los efectos individuales, las interacciones y las respuestas combinadas de los ácidos. También se generaron gráficos de efectos (dirección de Piepel) y gráficos de contornos. Se determinó que la mezcla óptima era 4.95 g de ácido cítrico, 4.65 g de ácido málico y 5.40 g de ácido fumárico, logrando un valor de respuesta combinado óptimo de 107.14. En conclusión, equilibrar estos tres ácidos es fundamental para optimizar los niveles de acidez y aroma en los caramelos de goma con sabor a naranja. Este estudio proporcionó una metodología valiosa para formular productos de confitería con perfiles sensoriales mejorados. Demostró la capacidad de R para abordar problemas complejos tanto en la industria de la confitería como en el mundo académico, enfatizando su importancia como herramienta analítica para desarrollar productos con características sensoriales mejoradas.

**Palabras clave:** Caramelos de goma, acidulantes, diseño de mezclas simplex-lattice, escala hedónica, programación en R

---

## INTRODUCTION

Gummy candies are primarily made from saturated solutions of refined sucrose and corn syrups (glucose 42 DE). However, sucrose can also be replaced with polyols such as isomalt or erythritol [1]. These ingredients are mixed and heated to a cooking temperature between 106 and 120°C, with pre-hydrated gelatin added, although other hydrocolloids can also be used. Finally, food additives such as colorants, flavorings, and acidulants are incorporated into the mixture [1,2,3].

The flavoring agents and the acidulants are critical for enhancing flavor perception in these products. The importance of flavor in consumer acceptance is fundamental in the food industry. A food's palatability, determined by its taste and other sensory characteristics, drives consumer preferences and choices, significantly influencing a product's acceptability and market success [4,5,6]. The addition of acidulants, such as citric, malic, and fumaric acids, in citrus-flavored gummy candies plays a vital role in improving the flavor profile by adding sourness, freshness, and balance to the citrus taste, creating a pleasant and satisfying sensory experience for consumers [7,8,9].

One of the main challenges in the confectionery industry is product formulation and reformulation. Statistical methods such as the simplex-lattice mixture design have addressed this issue. This approach systematically and efficiently explores the interaction between multiple ingredients in varying proportions, which is critical for achieving optimal sensory and nutritional properties, maximizing efficiency, and reducing the need for numerous tests and trials [10,11,12].



The scientific community has long debated the merits of R and Python for experiment design, with both languages offering distinct advantages. R is powerful in statistical analysis and experimental design, especially for complex tasks like mixture experiments. Its robustness in handling these designs has been well-documented, making it a popular choice in research and industries like food, pharmaceuticals, and chemicals. Several studies in the literature highlight the effectiveness of these R packages in practical applications [13]. The R package 'mixexp' is handy for generating mixture designs, which can be challenging to implement in other languages, including Python [14]. For example, in a study, the use of 'mixexp' was reported to optimize the formulation of a food product, achieving results that were not easily replicable using other software platforms [10]. This package optimizes responses based on component proportions, offering specialized functions for designing mixtures under linear and nonlinear constraints—an essential feature in many experimental contexts [10,14,15]. While Python is praised for its ease of use and intuitive syntax, it does not match R's capabilities in complex experimental designs, particularly for mixtures. Although Python has packages like Salmon and Pymix that offer similar functionality, they do not yet reach the depth and specialization of R's tools [16]. Furthermore, R's extensive and well-documented statistical packages make it invaluable in academic research, where precision and detailed analysis are critical [17].

When comparing R and Python to proprietary software like Design Expert, several advantages of open-source programming languages stand out. While Design Expert provides advanced design capabilities, it is costly and offers limited flexibility for customization beyond its graphical interface. In contrast, R and Python are free, removing the financial barrier of expensive licenses and providing greater flexibility and customization due to their open-source nature [18]. This accessibility allows researchers to utilize powerful analytical tools without the burden of high costs. R and Python's flexibility also enables users to tailor their code to specific requirements, which is critical for conducting complex experiments. In academic settings, using R and Python also fosters collaboration and knowledge-sharing. As open-source software, they allow researchers to share scripts and methodologies, promoting reproducibility and transparency in research [19,20]. This contrasts with proprietary software, where access to source code and underlying methodologies is often restricted, potentially hindering the verification of results and replication of studies [21].

Therefore, in educational environments, R and Python offer extensive tutorials, documentation, and community support, facilitating the learning and implementation of advanced data analysis techniques [22]. This is particularly valuable in academia, where continuous learning and access to educational resources are essential for researchers' professional development. As open-source and free, R is widely accessible across academic, industrial, and research settings, helping to bridge the digital divide by providing advanced tools without the burden of high costs.

Based on the above, the objective of this study was to develop R scripts using the simplex-lattice mixture design to optimize the sourness and flavor levels and the combined response of these attributes for orange-flavored gummy candies. The aim was to provide step-by-step explained scripts applied to a practical case, demonstrating how these tools can enhance the sensory properties of products in the confectionery industry.

## MATERIALS AND METHODS

### Preparation of gummy candies

The gummy candies were prepared following a formulation and process provided for academic purposes by a confectionery company in Mineral de la Reforma, Hidalgo, Mexico. Due to the nature of the project, citing the details of the process or the quantities of ingredients and food additives used was not permitted, except in the final stage related to the addition of acidifying agents. At this stage, for a mixture of water, refined sucrose, and corn syrup previously cooked at a specific temperature and combined with hydrated gelatin wholly dissolved, a liquor prepared with artificial orange flavoring, orange artificial coloring, water, and 15 g of an acid blend (citric, fumaric, and malic acids) was added, adjusted according to the simplex-lattice mixture design shown in Table 1. Finally, the mixture of all ingredients and food additives was homogenized and dosed into drop-shaped silicone molds. The gummy candies were left to solidify and rest for a specified time, then de-molded, coated with refined sugar, and left to rest for an additional period. Finally, they were stored in airtight glass containers until used for sensory analysis.

**TABLE 1.** Experimental design and mass fraction of the three acids used in the formulation of orange-flavored gummy candies according to the simplex-lattice mixture design.

Index	Uncoded values (fractions of the acids)			Coded values (g)		
	x1	x2	x3	Citric acid	Malic acid	Fumaric acid
M1	1	0	0	15	0	0
M2	0.5	0.5	0	7.5	7.5	0
M3	0	1	0	0	15	0
M4	0.5	0	0.5	7.5	0	7.5
M5	0	0.5	0.5	0	7.5	7.5
M6	0	0	1	0	0	15
M7	0.75	0.25	0	11.25	3.75	0
M8	0.75	0	0.25	11.25	0	3.75
M9	0.5	0.25	0.25	7.5	3.75	3.75
M10	0.25	0.75	0	3.75	11.25	0
M11	0.25	0.5	0.25	3.75	7.5	3.75
M12	0.25	0.25	0.5	3.75	3.75	7.5
M13	0	0.75	0.25	0	11.25	3.75
M14	0.25	0	0.75	3.75	0	11.25
M15	0	0.25	0.75	0	3.75	11.25

## Sensorial analysis

The sensory analysis was conducted as described in previous research, with modifications [23,24,25]. A group of 30 trained panelists, all students of the Bachelor's Degree in Food Chemistry at the Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mexico, conducted the sensory evaluation to identify the analyzed attributes (sourness and flavor). The samples were individually presented to evaluators on cardboard plates labeled with three-digit characters. The panelists provided scores from 1 to 5 for each attribute analyzed as follows: Sourness: 1 = very slightly intense, 2 = slightly intense, 3 = adequate, 4 = intense, and 5 = very intense. Flavor: 1 = dislike, 2 = neither like nor dislike, 3 = like slightly, 4 = like moderately, and 5 = like very much.

The number of scores for each point on the hedonic scale was multiplied by the corresponding coefficient, and the cumulative sum for each evaluated formulation was calculated to use the value as a response variable. Equation 1 represents this:

$$y = \sum_{i=1}^5 n_i c_i \quad (1)$$

where  $y$  is the response value (sourness, flavor, or combined level),  $n_i$  is the number of scores for point  $i$  on the scale, and  $c_i$  is the coefficient for point  $i$  on the scale.

## R scripts

All scripts used to produce the results of the analyses presented in this document were implemented using the R programming language (v.4.1.2, "Bird Hippie") and the integrated development environment RStudio® (v.2024.04.2) on a computer running the elementary OS 7.1 Horus operating system (based on Ubuntu 22.04.3 LTS, Linux 6.5.0-44-generic). The libraries used included 'mixexp', 'Ternary', 'viridisLite', 'PlotTools', 'stats', and 'dplyr'. All scripts are also provided as executable R files with their respective documentation, datasets, and model summaries. Everything has been uploaded to GitLab so that interested parties can access them for analysis and implementation (<https://gitlab.com/FoodChem-DataSci-Lab/orange-flavored-gummy-candies>).

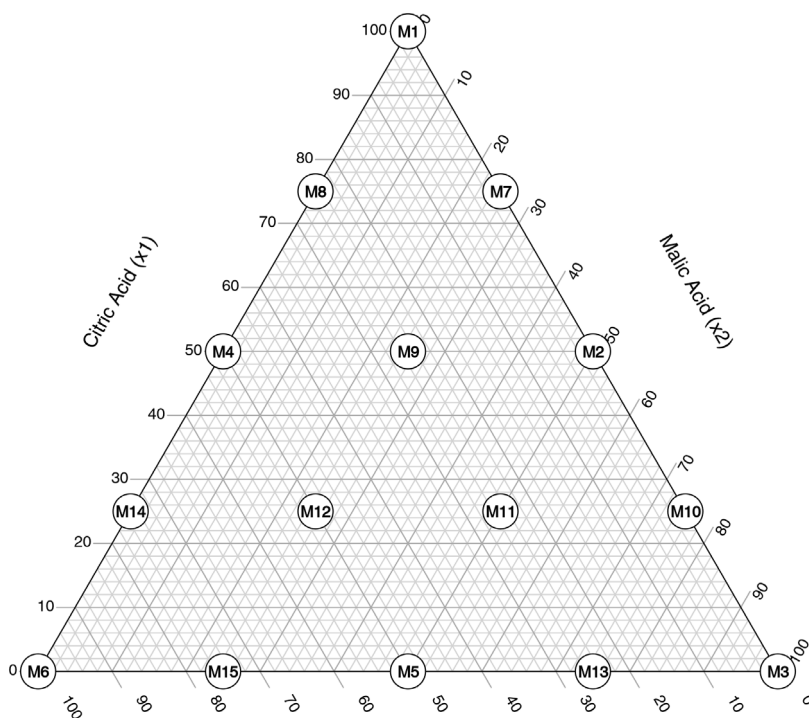
## Simplex-Lattice mixture design configuration

First, an R file named "simplex\_lattice\_design.R" was created, and the script used to define and configure the mixture design was developed. This design was established according to the procedures described in previous research [26,27,28]. In the script, the mixexp library was used to set up a simplex-lattice mixture design with three factors: citric acid ( $x_1$ ), malic acid ( $x_2$ ), and fumaric acid ( $x_3$ ), as well as two additional levels at zero using the SLD function (**simplex\_lattice\_desing\_1 <- SLD(fac = 3, lev = 2)**). Subsequently, the design was enriched with interior points using the Fillv function (**simplex\_lattice\_design\_2 <- Fillv(3, simplex\_lattice\_design\_1)**), ensuring complete coverage of the experimental space, as this configuration generated 15 different mixtures [14,15,29].

The factors were coded by multiplying the values by 15 to obtain the amounts of the acids in grams (**simplex\_lattice\_desing\_2\$citric\_acid <- 15 \* simplex\_lattice\_desing\_2\$x1**, etc.). To visualize the combinations, the 'TernaryPlot' library was used



to set up the ternary plot, and the AddToTernary function was used to add the points and experiment numbers, thereby generating an index of experiments within the plot (**AddToTernary(graphics::points, data\_points, pch = 21, cex = 4, bg = "white")**). This plot can be seen in Figure 1. Finally, the design was exported to a CSV file (**write.csv(simplex\_lattice\_design\_2, file = "simplex\_lattice\_design\_ORANGE.csv", row.names = FALSE)**), facilitating the subsequent analysis of experimental data and the optimization of the gummy candies' sourness and flavor levels. The resulting experiment matrix can be seen in Table 1.



**FIGURE 1:** Arrangement of mixture points using the simplex-lattice design method in a ternary plot.

The selection of the simplex-lattice mixture design was driven by its specific suitability for experiments where the response variables are functions of the proportions of the components in a mixture rather than their absolute quantities. The elements' proportions (factors) are involved in mixture designs, and the mix's total amount is usually fixed. This means that the quantity of each component is proportional to the total mixture, and unlike in factorial designs, the proportions of the elements cannot vary independently since they are constrained by the requirement that their sum must be constant (1 or 100%). This interdependency is a critical characteristic that distinguishes mixture designs from other approaches like Central Composite Design or Box-Behnken Design, where factors can vary independently. The analysis in mixture designs is conducted through

a response surface, which allows for the identification of the optimal mixture [30,31]. This approach is particularly appropriate for optimizing formulations in food science, where the balance of ingredients directly influences the product's sensory attributes. Previous studies have demonstrated the effectiveness of this design in similar contexts, supporting its application in this work [24,28,29,30,31]. The advantages of using a simplex-lattice mixture design include a comprehensive exploration of the experimental space with fewer trials and the ability to capture complex interactions between components [32], thereby providing a robust framework for optimizing the sensory properties of the orange-flavored gummy candies.

## ANALYSIS OF RESULTS

R scripts were created to perform the statistical analysis of the results. Below is a general explanation of the script used to analyze the influence of the factors on the sourness level; however, the script for flavor level analysis was similar. Both scripts have been uploaded to GitLab as executable R files in the project directory. Initially, necessary libraries such as 'mixexp', 'Ternary', 'viridisLite', 'PlotTools', and 'stats' were loaded. The experimental results dataset was imported using `read.csv("sourness.csv")`.

The optimization model was constructed using the linear regression function `lm`, which considered the main effects and interactions of citric acid ( $\mathbf{x1}$ ), malic acid ( $\mathbf{x2}$ ), and fumaric acid ( $\mathbf{x3}$ ) on the sourness level ( $\mathbf{y}$ ) (`sourness_model <- lm(y ~ x1 + x2 + x3 + x1:x2 + x1:x3 + x2:x3 + x1:x2:x3 - 1, data = dataset)`) [28,33,34]. This is in accordance with Equation 2:

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (2)$$

where  $\mathbf{y}$  is the estimated response (sourness, flavor, or combined level), and  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$ , and  $\beta_{123}$  are constant coefficients for each linear and non-linear interaction term.

The model summary was saved to a text file using capture for documentation purposes. `output(summary(sourness_model), file = "summary_model_sourness.txt")`.

To visualize the effects of the mixture components, an effect plot (Piepel direction) was generated and saved as a PNG file at 300 DPI (`EffPlot(des = dataset, mod = 2, dir = 1)`). The 'TernaryPlot' library was used to display the response surface of the model in a ternary plot format, defining a function to contour the response surface (`FunctionToContour <- function(a, b, c) { predict(sourness_model, newdata = data.frame(x1 = a, x2 = b, x3 = c)) }`). Contour lines and experiment data points, labeled with experiment numbers, were added to the plot (`AddToTernary(graphics::points, data_points, pch = 21, cex = 4, bg = "white")`). A continuous legend for the color scale was also included to indicate the intensity of the response.

Finally, the optimal combination of the mixture was determined using a function that predicted sourness levels based on the model coefficients (`coefficients <- coef(sourness_model)`). This function, `sourness_level`, calculated the predicted



sourness for given levels of the three acids, incorporating interactions among them. A grid of possible mixtures was created, and the optimal mixture with the highest predicted sourness was identified (**result <- predict\_best\_mixture()**). The results, including the optimal values for **x1**, **x2**, and **x3**, along with the corresponding sourness level, were saved to a text file (**writeLines(results, "optimal\_sourness\_level\_results.txt")**). This analysis facilitated the determination of the ideal formulation to achieve the desired sourness in the orange-flavored gummy candies.

## Combined model

The file "combined\_model.R" was created to develop a combined model integrating the sourness and flavor levels in orange-flavored gummy candies. The goal was to determine the optimal combination of citric acid (**x1**), malic acid (**x2**), and fumaric acid (**x3**) to maximize both responses. The following describes each stage of the process, including the code used and an explanation of its purpose and functionality. This script has been uploaded to GitLab as an executable R file in the project directory.

Initially, necessary libraries such as 'mixexp', 'Ternary', 'viridisLite', 'PlotTools', 'stats', and 'dplyr' were loaded. The datasets containing experimental results for sourness and flavor were imported using **read.csv("sourness.csv")** and **read.csv("flavor.csv")**, respectively.

Separate linear regression models were developed for sourness and flavor levels using the **lm** function, considering main effects and interactions among acids (**sourness\_model <- ...** and **flavor\_model <- ...**), excluding the intercept [28,33]. A combined dataset was created by merging the sourness and flavor datasets and calculating a combined response variable (**combined\_dataset <- ...**). The combined response variable **y\_combined** is calculated as the average of **y\_sourness** and **y\_flavor**, giving equal weight to both sensory properties. This combined measure provided a holistic view of the product's sensory profile.

The combined model was then developed using the **lm** function (**combined\_model\_lm <- lm(y\_combined ~ x1 + x2 + x3 + x1:x2 + x1:x3 + x2:x3 + x1:x2:x3 - 1, data = combined\_dataset)**), excluding the intercept, and the summary was saved to a text file ("summary\_combined\_model.txt"). A function, **combined\_model**, was defined to predict responses based on the combined model (**combined\_model <- function(a, b, c) ...**). It uses three arguments, **a**, **b**, and **c**, representing the proportions of acids to create a new data frame. Then, the **predict** function was used to generate predictions from the **combined\_model\_lm** model with this new data set, returning the predicted result [26].

For visualization, the **EffPlot** function was used to create an effects plot, saved as a PNG file. A ternary plot was generated to illustrate the response surface, including contour lines representing the combined response (**TernaryPlot(alab = "Citric acid (x1)", ...)** [14,15]. The optimal combination of **x1**, **x2**, and **x3**, yielding the highest combined response, was identified using a grid search approach (**predict\_best\_combined\_mixture()**), with results saved to a text file ("optimal\_combined\_level\_results.txt"). The optimal point was also highlighted in the ternary plot (**AddToTernary(graphics::points, matrix(unlist(optimal\_values), ncol = 3), pch = 19, col = "red", cex = 2)**). This analysis comprehensively evaluated the optimal mixture to balance sourness and flavor in the orange-flavored gummy candies.



## RESULTS AND DISCUSSION

### Sourness level model

The sourness level model demonstrated high accuracy, as indicated by the Multiple R-squared value of 0.9926 and an adjusted R-squared of 0.9926 (Table 2). These values suggested that the model explained approximately 99.26% of the variance in the sourness response, highlighting the model's predictive solid capability. The coefficients for the primary factors, citric acid ( $x_1$ ), malic acid ( $x_2$ ), and fumaric acid ( $x_3$ ), were all statistically significant, with p-values below 0.05. The coefficient estimates were 80.759 for  $x_1$ , 89.474 for  $x_2$ , and 90.545 for  $x_3$ , indicating that these acids contributed significantly to the sourness level. However, the interaction terms, including  $x_1x_2$ ,  $x_1x_3$ ,  $x_2x_3$  and  $x_1x_2x_3$ , were not statistically significant, suggesting that the combined effects of these acids did not significantly influence the sourness beyond their individual contributions. The model's residual standard error was 11.140, reflecting the average deviation of the observed data points from the fitted model, and the F-statistic of 153.4 indicated a highly significant model overall, with a p-value of  $6.919 \times 10^{-8}$ .

**Table 2.** Model coefficients and statistical summary for sourness level, flavor level, and combined levels models.

Model	Coefficients	Standard Error	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> -adjusted	Residual Standard Error	p-value	F-statistic
Sourness level	$x_1$ : 80.759 $x_2$ : 89.474 $x_3$ : 90.545 $x_1x_2$ : 42.836 $x_1x_3$ : 26.550 $x_2x_3$ : 40.836 $x_1x_2x_3$ : 40.296	$x_1$ : 9.905 $x_2$ : 9.905 $x_3$ : 9.905 $x_1x_2$ : 46.054 $x_1x_3$ : 46.054 $x_2x_3$ : 46.054 $x_1x_2x_3$ : 286.911	0.9926	0.9926	11.140	$6.919 \times 10^{-8}$	153.4
Flavor level	$x_1$ : 96.045 $x_2$ : 113.545 $x_3$ : 107.688 $x_1x_2$ : 3.122 $x_1x_3$ : 43.693 $x_2x_3$ : -48.593 $x_1x_2x_3$ : 216.296	$x_1$ : 9.702 $x_2$ : 9.702 $x_3$ : 9.702 $x_1x_2$ : 45.113 $x_1x_3$ : 45.113 $x_2x_3$ : 45.113 $x_1x_2x_3$ : 281.047	0.9945	0.9945	10.910	$2.119 \times 10^{-8}$	206.7
Combined level	$x_1$ : 88.402 $x_2$ : 101.509 $x_3$ : 99.116 $x_1x_2$ : 22.979 $x_1x_3$ : 35.122 $x_2x_3$ : -3.878 $x_1x_2x_3$ : 128.296	$x_1$ : 6.112 $x_2$ : 6.112 $x_3$ : 6.112 $x_1x_2$ : 28.417 $x_1x_3$ : 28.417 $x_2x_3$ : 28.417 $x_1x_2x_3$ : 177.036	0.9975	0.9975	6.872	$8.845 \times 10^{-10}$	459.5

## Flavor level model

The flavor model also exhibited strong performance, with a Multiple R-squared value of 0.9945 and an adjusted R-squared of 0.9945, indicating that 99.45% of the variance in the flavor response was explained by the model. The coefficient estimates for citric acid ( $x_1$ ), malic acid ( $x_2$ ), and fumaric acid ( $x_3$ ) were 96.045, 113.545, and 107.688, respectively. These values demonstrated that malic acid had the highest influence on flavor, followed by fumaric and citric acids. The standard errors for these coefficients were relatively small, suggesting precise estimates. Unlike the sourness model, the flavor model showed a significant interaction term for  $x_1x_3$ , with a coefficient estimate of 43.693, indicating a notable combined effect of citric and fumaric acids on flavor. The model's residual standard error was 10.910, slightly lower than the sourness model's, indicating a better fit. The F-statistic was 206.7, with a p-value of  $2.119 \times 10^{-8}$ , confirming the overall statistical significance of the model.

## Combined sourness and flavor level model

The combined model, which integrated sourness and flavor responses, achieved the highest accuracy among the three models. It had a Multiple R-squared value of 0.9975 and an adjusted R-squared of 0.9975, suggesting that the model explained 99.75% of the variance in the combined response. The coefficient estimates for citric acid ( $x_1$ ), malic acid ( $x_2$ ), and fumaric acid ( $x_3$ ) were 88.402, 101.509, and 99.116, respectively, indicating that malic acid was the dominant contributor to the combined response, followed closely by fumaric and citric acids. The interaction term  $x_1x_2$  was also notable, with a coefficient estimate of 128.296, suggesting a significant three-way interaction effect on the combined response. The residual standard error of 6.872 was the lowest among the models, indicating an exact fit. The F-statistic was 459.5, with a p-value of  $8.845 \times 10^{-10}$ , underscoring the solid overall significance of the combined model.

## Effect (Piepel direction) and Contour plots

In analyzing the sourness level, the effects of citric acid ( $x_1$ ), malic acid ( $x_2$ ), and fumaric acid ( $x_3$ ) on orange-flavored gummy candies were evaluated. The effect plot (Piepel direction) showed the predicted sourness response as a function of deviation from the centroid for each component (Figure 2a) [35,36]. Citric acid ( $x_1$ ) had the most significant effect, peaking above 100, while malic acid ( $x_2$ ) and fumaric acid ( $x_3$ ) had smaller, similar effects. Each curve reached local maxima, indicating optimal concentration points for each acid. The contour plot in Figure 2a, a ternary diagram, depicted the response surface for sourness based on the proportions of the acids. Lighter areas indicated higher sourness, with the highest level (around 100) in the central yellow area [37], suggesting synergy between the acids. Sourness decreased as one acid became dominant, especially at the vertices. Optimal combinations for high sourness were near the center, with roughly equal proportions of the three acids, indicating that a balanced mixture optimized sourness in the orange-flavored gummy candies.

The optimal combination of acids to maximize the sourness level was determined with the R script, using the fitted model and the **predict\_best\_mixture** function, as described in the Materials and Methods sections. The analysis revealed that the best mixture consisted of 2.7 g of citric acid ( $x_1$ ), 6.45 g of malic acid ( $x_2$ ), and 5.85 g of fumaric acid ( $x_3$ ), achieving



a predicted sourness level of 101.57. These results confirm that a balanced combination of the three acids is adequate for optimizing the sourness in the orange-flavored gummy candies, providing valuable guidance for the final product formulation.

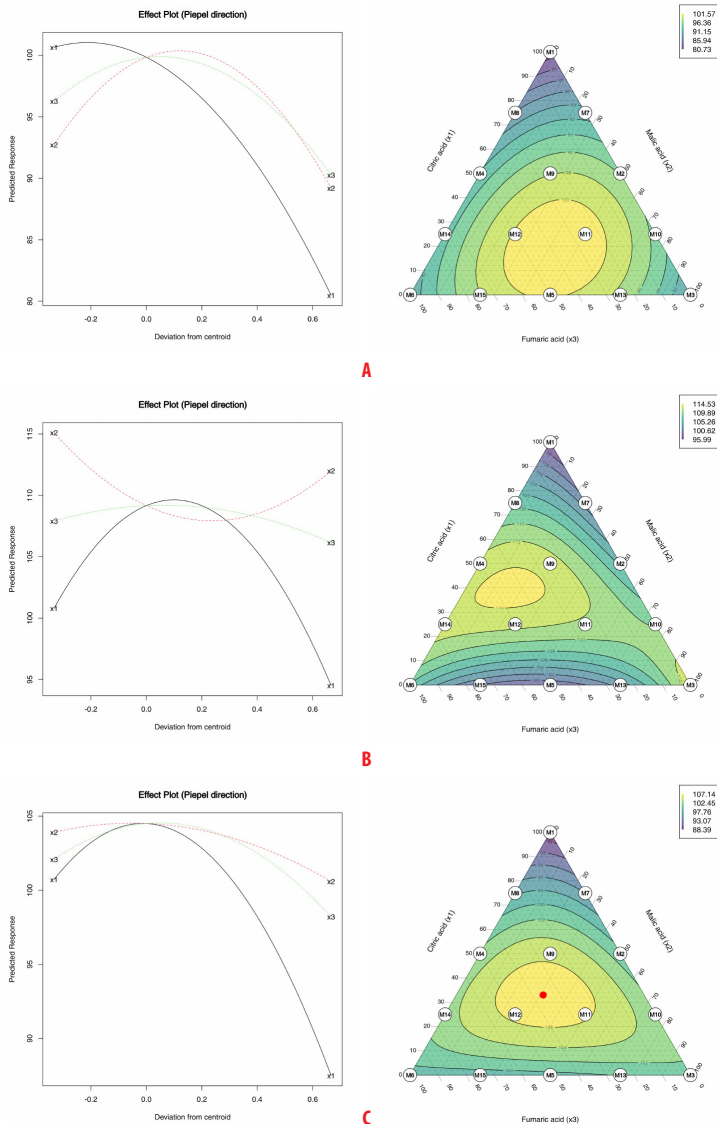
Concerning flavor level analysis, the effect plot (Figure 2b) showed that the citric acid ( $x_1$ ) had a significant quadratic effect, peaking and decreasing. Malic acid ( $x_2$ ) decreased flavor liking with deviation, while fumaric acid ( $x_3$ ) showed a slight decrease followed by an increase, with less impact than  $x_1$  and  $x_2$  [36,38]. Citric acid had the most pronounced effect on flavor liking, followed by malic and fumaric acid. The ternary contour plot (Figure 2b) depicted the response surface for the acid combinations. Contour lines indicated flavor level, with blue for lower and yellow for higher flavor level. The highest liking areas (yellow) were centered around specific acid combinations, showing an optimal blend. The best combinations included moderate citric acid and lower malic and fumaric acids. This plot showed how the acid combinations affected flavor level, helping identify the optimal proportions for maximizing this sensory attribute.

The analysis with the R script computed the best combination of the three acids, yielding the following proportions: 6 g of citric acid ( $x_1$ ), 2.4 g of malic acid ( $x_2$ ), and 6.6 g of fumaric acid ( $x_3$ ). This combination resulted in a maximum flavor level of 114.53. This result revealed that higher proportions of citric acid and fumaric acid significantly contribute to flavor liking, while a smaller amount of malic acid is beneficial. The graphical analysis supports this conclusion, showing that citric acid has a pronounced positive effect on flavor perception, while malic acid has a less favorable impact. The optimal interaction between these acids highlights the importance of balancing their proportions to achieve the best sensory profile.

Finally, the combined analysis with R integrated sourness and flavor level responses. The effect plot (Figure 2c) showed how citric acid ( $x_1$ ), malic acid ( $x_2$ ), and fumaric acid ( $x_3$ ) influenced the combined response. Malic acid ( $x_2$ ) had the highest predicted response, followed by fumaric acid ( $x_3$ ) and citric acid ( $x_1$ ), with each acid showing a peak followed by a decline. The contour plot (Figure 2c) depicted the combined response surface, with the optimal point near the center (a red point). The best combination was 4.95 g of citric acid, 4.65 g of malic acid, and 5.4 g of fumaric acid, achieving a combined optimal response of 107.14. This indicates that balancing the three acids optimizes both sourness and flavor levels. The slightly higher proportion of fumaric acid suggests its vital role in enhancing the combined response.

All three models demonstrated high accuracy and statistical significance, with the combined model providing the most comprehensive explanation of the data variance. The inclusion of interaction terms in the combined model underscored the importance of considering the joint effects of the acids on the sensory characteristics of orange-flavored gummy candies. This analysis using the R programming language offered practical guidance for adjusting gummy formulations to ensure that consumers optimally perceive both sourness and flavor. Future research should include confirmatory experiments, as this study primarily aimed to demonstrate the optimization of a confectionery product with R. There are limited examples in scientific journals that show step-by-step R scripts, which could greatly benefit researchers, students, food developers, and others interested in the topic.

Finally, while no studies have directly compared the performance of Python, R, and Design Expert in the context of simplex-lattice design, both Python and R are recognized as powerful tools for data analysis, each with distinct advantages. Design Expert, by contrast, offers a more user-friendly option for those seeking to perform experimental designs without programming. Future research should prioritize direct comparisons to clarify the strengths and limitations of each tool in this specific context.



**FIGURE 2.** Influence of citric (x1), malic (x2), and fumaric (x3) acids on sourness level (a), flavor level (b), and combined level of sourness and flavor (c) in orange-flavored gummy candies: Effect (Piepel direction) and Contour Plots.

## CONCLUSIONS

This study optimized the flavor profile of orange-flavored gummy candies using a simplex-lattice mixture design implemented in the R programming language. The key findings indicated that the optimal combination of acids to maximize flavor liking was 6 g of citric acid, 2.4 g of malic acid, and 6.6 g of fumaric acid, achieving a maximum liking score of 114.53. The developed regression models allowed for the evaluation of the individual effects of each acid and their binary and ternary interactions without considering an intercept. The assessment of the coefficients and the statistical significance of each term determined the specific influence of each acid and their combinations on sourness and flavor levels, providing a valuable tool for optimizing formulations and improving the final product quality. These results offer guidance for gummy manufacturers, food technologists, and others interested in the topic, enabling them to adjust formulations to maximize consumer satisfaction.

The research also emphasized the importance of using open-source software like R to optimize confectionery product formulations. As open-source and free software, R allowed for complex and detailed analyses in an accessible and efficient manner, facilitating the evaluation of the individual and combined effects of acids on the gummy flavor profile. This accessibility could contribute to reducing research costs and promote democratizing access to advanced analytical tools, fostering innovations in the food industry and food science research.

Prospects of this research include applying the developed methodology to other flavors and types of confectionery products to validate and extend the findings. Additionally, it is recommended that other acidulants and their impact on the sensory profile of products be explored, as well as the implementation of emerging technologies in food formulation and processing to further improve product quality and acceptance. The research can also extend to shelf-life and stability studies, ensuring optimized formulations maintain their sensory properties over time.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) and the Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) for their support. They dedicate this research to the memory of Dr. Santiago Ricardo Tomás Filardo Kerstupp (1945-2021).

## CREDIT AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT

Lizbeth Chávez-Reyes: Writing – original draft, Investigation. Laura García-Curiel: Methodology, Software. Jesús Guadalupe Pérez-Flores: Writing – original draft, Software, Conceptualization. Emmanuel Pérez-Escalante: Writing – review & editing. Elizabeth Contreras-López: Writing – review & editing. Lizbeth Anahí Portillo-Torres: Validation. Luis Guillermo González-Olivares: Validation. Carlos Ángel-Jijón: Validation.



## CONFLICT OF INTEREST

The authors state that there are no conflicts of interest regarding the publication of this article.

## REFERENCES

- [1] González-Otamendi, M. D. J., Pérez-Flores, J. G., Contreras-López, E., Soto-Vega, K., García-Curiel, L., Pérez-Escalante, E., Islas-Martínez, D., Jijón, C. Á., & Portillo-Torres, L. A. (2024). Uso de polioles en la industria de la confitería. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(3), 499-528. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v8i3.11259](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.11259)
- [2] Gómez, M. M. R., & Sánchez, N. E. O. (2011). Productos gelificados y aireados. In *Confitería: De lo artesanal a la tecnología* (pp. 179-209). Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- [3] Hartel, R. W., Von Elbe, J. H., & Hofberger, R. (2018). Jellies, gummies and licorices. In R. W. Hartel, J. H. Von Elbe, & R. Hofberger, *Confectionery science and technology* (pp. 329-359). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-61742-8>
- [4] Chen, X., Zhang, W., Quek, S. Y., & Zhao, L. (2023). Flavor–food ingredient interactions in fortified or reformulated novel food: Binding behaviors, manipulation strategies, sensory impacts, and future trends in delicious and healthy food design. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(5), 4004-4029. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13195>
- [5] Hou, L., Zhang, Y., Li, C., Wang, X., & Wang, S. C. (2021). Determination of main bitter compounds in soaked and germinated sesame pastes. *Journal of Oleo Science*, 70(1), 31-38. <https://doi.org/10.5650/jos.ess20169>
- [6] Qian, R., Sun, C., Bai, T., Yan, J., Cheng, J., & Zhang, J. (2024). Recent advances and challenges in the interaction between myofibrillar proteins and flavor substances. *Frontiers in Nutrition*, 11, 1378884. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1378884>
- [7] Goldenberg, L., Yaniv, Y., Kaplunov, T., Doron-Faigenboim, A., Carmi, N., & Porat, R. (2015). Diversity in sensory quality and determining factors influencing mandarin flavor liking. *Journal of Food Science*, 80(2), S418-S425. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12742>
- [8] Hülber-Beyer, É., Bélafi-Bakó, K., & Nemesóthy, N. (2021). Low-waste fermentation-derived organic acid production by bipolar membrane electrodialysis—An overview. *Chemical Papers*, 75(10), 5223-5234. <https://doi.org/10.1007/s11696-021-01720-w>
- [9] Mao, Y., Tian, S., Qin, Y., & Cheng, S. (2021). An optimized organic acid human sensory sourness analysis method. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(14), 5880-5887. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11240>
- [10] Rodríguez-Sánchez, F. (2020). Quince consejos para mejorar nuestro código y flujo de trabajo con R. *Ecosistemas*, 29(3). <https://doi.org/10.7818/ECOS.2129>
- [11] Santos, F. G., Fratelli, C., Muniz, D. G., & Capriles, V. D. (2018). Mixture design applied to the development of chickpea-based gluten-free bread with attractive technological, sensory, and nutritional quality. *Journal of Food Science*, 83(1), 188-197. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14009>
- [12] Squeo, G., De Angelis, D., Leardi, R., Summo, C., & Caponio, F. (2021). Background, applications and issues of the experimental designs for mixture in the food sector. *Foods*, 10(5), 1128. <https://doi.org/10.3390/foods10051128>
- [13] K K, S., C, S. C., K, S., M, C, J., Raj, A., & Kappally, S. (2023). Statistical design of experiments using R program for the optimization of an extended-release neem oil matrix tablet. *Journal of Pharmaceutical Innovation*, 18(1), 205-219. <https://doi.org/10.1007/s12247-022-09640-2>
- [14] Lawson, J., & Willden, C. (2016). Mixture experiments in R using mixexp. *Journal of Statistical Software*, 72(Code Snippet 2). <https://doi.org/10.18637/jss.v072.c02>
- [15] Lawson, J., & Willden, C. (2011). *mixexp: Design and analysis of mixture experiments* (p. 1.2.7) [Dataset]. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.mixexp>
- [16] Boyd, A., & Sun, D. L. (2024). salmon: A symbolic linear regression package for Python. *Journal of Statistical Software*, 708(8). <https://doi.org/10.18637/jss.v108.i08>
- [17] Liu, X., Yue, R.-X., Xu, J., & Chatterjee, K. (2016). Algorithmic construction of R-optimal designs for second-order response surface models. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 178, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.jspi.2016.05.003>
- [18] Sánchez Villena, A. (2019). Uso de programas estadísticos libres para el análisis de datos: Jamovi, Jasp y R. *Revista Perspectiva*, 20(1), 112-114. <https://doi.org/10.33198/rp.v20i1.00026>

- [19] Ke, Y., Yang, R., & Liu, N. (2024). Comparing open-access database and traditional intensive care studies using machine learning: Bibliometric analysis study. *Journal of Medical Internet Research*, 26, e48330. <https://doi.org/10.2196/48330>
- [20] Mittal, D., Mease, R., Kuner, T., Flor, H., Kuner, R., & Andoh, J. (2023). Data management strategy for a collaborative research center. *GigaScience*, 12, giad049. <https://doi.org/10.1093/gigascience/giad049>
- [21] Freire, M. A. M., Lema, L. D. C. Z., & Rivera, S. M. H. (2021). Estadística descriptiva con r. Gráficos avanzados y aplicaciones. In *Editorial Universidad Nacional de Chimborazo*. Editorial Universidad Nacional de Chimborazo. <https://doi.org/10.37135/u.editorial.05.35>
- [22] Salas-Molina, F., Pla-Santamaria, D., García-Bernabeu, A., & Utrero-González, N. (2023, July 13). Una revisión de experiencias y recursos educativos para aprender economía y finanzas con Python. In *Red 2023 - IX Congreso Nacional de Innovación Educativa y Docencia en Red*. IN-RED 2023: IX Congreso de Innovación Educativa y Docencia en Red. <https://doi.org/10.4995/INRED2023.2023.16511>
- [23] Canett Romero, R., Ledesma Osuna, A. I., Robles, S., Morales Castro, R., León Martínez, L., & León-Gálvez, R. (2004). Caracterización de galletas elaboradas con cascarilla de orujo de uva. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 54(1), 93-99. [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0004-06222004000100014](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222004000100014)
- [24] Kayacier, A., Yüksel, F., & Karaman, S. (2014). Simplex lattice mixture design approach on physicochemical and sensory properties of wheat chips enriched with different legume flours: An optimization study based on sensory properties. *LWT - Food Science and Technology*, 58(2), 639-648. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.03.032>
- [25] Plustea, L., Dossa, S., Dragomir, C., Cocan, I., Negrea, M., Obistoiu, D., Poiana, M.-A., Voica, D., Berbecea, A., & Alexa, E. (2024). Comparative study of the nutritional, phytochemical, sensory characteristics and glycemic response of cookies enriched with lupin sprout flour and lupin green sprout. *Foods*, 13(5), 656. <https://doi.org/10.3390/foods13050656>
- [26] Duarte, B. P. M., Atkinson, A. C., Granjo, J. F. O., & Oliveira, N. M. C. (2021). Optimal design of mixture experiments for general blending models. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 217, 104400. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2021.104400>
- [27] Galvagnini, F., Fredi, G., Dorigato, A., Fambri, L., & Pegoretti, A. (2021). Mechanical behaviour of multifunctional epoxy/hollow glass microspheres/paraffin microcapsules syntactic foams for thermal management. *Polymers*, 13(17), 2896. <https://doi.org/10.3390/polym13172896>
- [28] Homayouni Rad, A., Pirouzian, H. R., Toker, O. S., & Konar, N. (2019). Application of simplex lattice mixture design for optimization of sucrose-free milk chocolate produced in a ball mill. *LWT*, 115, 108435. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108435>
- [29] Buruk Sahin, Y., Aktar Demirtaş, E., & Burnak, N. (2016). Mixture design: A review of recent applications in the food industry. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 22(4), 297-304. <http://doi.org/10.5505/pajes.2015.98598>
- [30] Grosso, G. S., Méndez, L. M. R., Tangarife, M. P. O., & Arias, N. R. (2015). Diseño experimental de mezclas como herramienta para la optimización de cremolácteos de mango. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 2(1), 16-24. <https://doi.org/10.23850/24220582.166>
- [31] Mendoza-Combatt, J. C., Fuentes-Medina, L., Mendoza-Combatt, M., & National Open and Distance University, Cartagena. (2021). Design of lattice simplex mixtures as a statistical tool for the inclusion of cowpea bean flour (*Vigna unguiculata*) in a cheese stick formulation. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 20(3), 1-14. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Alim2433>
- [32] Ospina-Casas, K., Laguado-Escobar, D., & Narváez-Cuenca, C. (2022). Using a mixture of hydrocolloids to mimic texture and rheological properties of a massive consumption food product. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(4). <https://doi.org/10.1111/jfpp.16440>
- [33] Kumle, L., Vö, M. L.-H., & Draschkow, D. (2021). Estimating power in (generalized) linear mixed models: An open introduction and tutorial in R. *Behavior Research Methods*, 53(6), 2528-2543. <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01546-0>
- [34] Miles, J. (2014). R squared, adjusted R squared. In R. S. Kenett, N. T. Longford, W. W. Piegorsch, & F. Ruggeri (Eds.), *Wiley StatsRef: Statistics reference online* (1st ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat06627>



- [35] Jankowski, J. (2017). Mixture seeding for sustainable information spreading in complex networks. In N. T. Nguyen, S. Tojo, L. M. Nguyen, & B. Trawiński (Eds.), *Intelligent information and database systems* (vol. 10191, pp. 191-201). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-54472-4\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54472-4_19)
- [36] Piepel, G. F. (1982). Measuring component effects in constrained mixture experiments. *Technometrics*, 24(1), 29-39. <https://doi.org/10.1080/00401706.1982.10487706>
- [37] Talens, C., Llorente, R., Simó-Boyle, L., Odriozola-Serrano, I., Tueros, I., & Ibagüen, M. (2022). Hybrid sausages: Modelling the effect of partial meat replacement with broccoli, upcycled brewer's spent grain and insect flours. *Foods*, 11(21), 3396. <https://doi.org/10.3390/foods11213396>
- [38] Olubi, O., Felix-Minnaar, J. V., & Jideani, V. A. (2021). Physicochemical, mineral and sensory characteristics of instant *Citrullus lanatus mucosospermus* (Egusi) soup. *Foods*, 10(8), 1817. <https://doi.org/10.3390/foods10081817>

## Diseño de un prototipo de batería de flujo redox de vanadio

Laura E. de Jongh Salazar <sup>1</sup>, José M. Barriola Damborenea <sup>1</sup>, María E. Álvarez Bermúdez <sup>1</sup>, Miguel M. Perez Hernández <sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Metropolitana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Energía y Automatización, Caracas, Venezuela.

\*Autor para correspondencia, email: [mperez@unimet.edu.ve](mailto:mperez@unimet.edu.ve)

## Design of a vanadium redox flow battery prototype

### Resumen

Las baterías de flujo redox de vanadio (BFRV) son alternativas prometedoras para mitigar la intermitencia de las redes eléctricas basadas en generación renovable, aunque requieren estudios y optimización. Este trabajo presenta el diseño teórico de un prototipo de BFRV de una celda a escala de laboratorio, con un sistema de recirculación de electrolito y un sistema de medición de variables, destinado a ser utilizado en la Universidad Metropolitana como herramienta educativa. A través de la investigación documental, se identificaron los criterios de diseño más importantes, definiendo las características que el diseño debía cumplir. La celda diseñada incluye canales de flujo en forma de serpentín, colectores de corriente de cobre y grafito, electrodos de fieltro de grafito y una membrana iónica. El sistema incorpora dos bombas peristálticas y sensores de corriente, voltaje, conductividad, temperatura y nivel del electrolito, conectados a un Arduino UNO. El diseño permite tres configuraciones con diferentes tamaños de electrodos (6, 12 y 24 cm<sup>2</sup>) y la variación del volumen de electrolito, su concentración y caudal. Se concluyó que el VOSO<sub>4</sub> es la fuente de vanadio óptima debido a su alta solubilidad. El sistema de monitoreo y control, implementado con Arduino, permite obtener mediciones precisas y en tiempo real, facilitando la recolección de datos. El costo estimado del prototipo es de 1025 USD, recomendándose la inclusión de sensores de conductividad por su importancia para estimar el estado de carga (SoC). Los resultados teóricos obtenidos mediante simulación en MATLAB son consistentes con las expectativas, respaldando la viabilidad y pertinencia de construir este prototipo en la Universidad Metropolitana.

**Palabras clave:** energía renovable, sistemas de almacenamiento, electroquímica, optimización de baterías, simulación, control automático.

### Abstract

Vanadium redox flow batteries (VRFB) are promising alternatives to mitigate the intermittency of renewable energy-based grids, although they require further studies and optimization. This work presents the theoretical design of a single-cell VRFB laboratory-scale prototype with an electrolyte recirculation system and a variable measurement system intended for use as an educational tool at the Universidad Metropolitana. The most critical design criteria were identified through documentary research, defining the characteristics the design needed to meet. The designed cell includes serpentine flow channels, copper and graphite current collectors, graphite felt



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Sebastián Ponce

Recibido /  
Received:  
22/08/2024

Aceptado /  
Accepted:  
31/10/2024

Publicado en línea /  
Published online:  
08/05/2025



electrodes, and an ion exchange membrane. The system incorporates two peristaltic pumps and sensors for current, voltage, conductivity, temperature, and electrolyte level, all connected to an Arduino UNO. The design allows for three configurations with different electrode sizes (6, 12, and 24 cm<sup>2</sup>) and electrolyte volume, concentration, and flow rate variations. It was concluded that VOSO<sub>4</sub> is the optimal vanadium source due to its high solubility. The monitoring and control system, implemented with Arduino, enables accurate real-time measurements, facilitating data collection. The estimated cost of the prototype is 1025 USD, and it is recommended that conductivity sensors be included due to their importance in assessing the state of charge (SoC). The theoretical results obtained through MATLAB simulation are consistent with expectations, supporting the feasibility and relevance of building this prototype at Universidad Metropolitana.

**Keywords:** renewable energy, storage systems, electrochemistry, battery optimization, simulation, automatic control.

---

## INTRODUCCIÓN

En el contexto global actual, la dependencia de los hidrocarburos expone a las naciones a la volatilidad de los precios del petróleo y contribuye al aumento de la contaminación [1]. Las energías renovables ofrecen una alternativa prometedora. Los sistemas de generación basados en fuentes renovables han experimentado un crecimiento significativo [2]; sin embargo, su principal desafío es la intermitencia y la imprevisibilidad de sus fuentes [2]. Los sistemas de almacenamiento energético permiten maximizar el aprovechamiento de estas fuentes durante los periodos de mayor generación [2]. Entre los distintos tipos de acumuladores de energía, las baterías de flujo redox de vanadio (BFRV) destacan por su eficiencia y fiabilidad [3, 4]. Para consolidar las energías alternativas en el esquema energético global, es fundamental continuar investigando el desempeño de estos acumuladores [3]. Este trabajo presenta el diseño detallado de un prototipo experimental de batería de flujo de vanadio, destinado a su futura implementación en la Universidad Metropolitana, respondiendo a la pregunta: ¿cuáles son las características de un prototipo funcional de BFRV a escala de laboratorio que sea viable construir en la Universidad Metropolitana?

Las baterías de flujo redox de vanadio (BFRV) son ampliamente estudiadas a nivel global, con diversos enfoques y escalas, con el fin de mejorar su eficiencia y comprender mejor su funcionamiento. La mayoría de las investigaciones comienzan a escala de laboratorio, aumentando la escala de los sistemas a partir de los resultados obtenidos. Un ejemplo de esto es el trabajo de López y Poma [5], quien desarrolló un prototipo de laboratorio y propuso estrategias de escalamiento. Patiño [2], por su parte, construyó un prototipo capaz de suministrar 4 W y detalló su instalación en el laboratorio. Otros estudios específicos, como el de Belmonte y Grespan [6], se enfocan en el desarrollo de membranas, mientras que Patiño [2] utilizó espectrofotometría UV-Visible para medir la concentración de iones en los electrolitos.



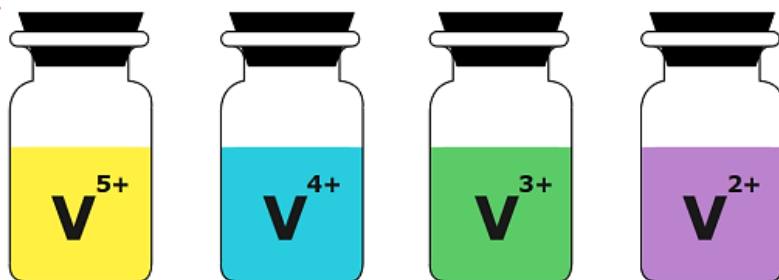
Schofield y Musilek [7] demostraron la variación lineal de la conductividad en función del estado de carga. Además, investigaciones sobre la densidad de corriente, concentración de ácido sulfúrico y sistemas de recirculación de electrolitos, como el análisis hidráulico de Ibáñez [8], también destacan en este campo. El control y la medición de datos, junto con simulaciones teóricas, son fundamentales, como lo ejemplifica el modelo de Al-Yasiri [9] y el sistema de control propuesto por López y Poma [5]. El costo de construcción representa otro desafío, abordado por Ghirlanda [10] y analizado económicamente por Ibáñez [8]. En este contexto, la investigación en la Universidad Metropolitana se suma a estos esfuerzos: Perdomo [11] resalta la eficiencia de las BFRV, Belmonte y Grespan [6] se enfocan en las membranas, y Sanoja [12] evalúa exhaustivamente los componentes y estrategias para su optimización. Este trabajo contribuye a la continuidad de la investigación en BFRV en la Universidad Metropolitana, Caracas, Venezuela.

## MARCO TEÓRICO

### Principio de funcionamiento

La celda electroquímica es la unidad básica de los sistemas de almacenamiento de energía [10]. Estas celdas están compuestas por dos electrodos, un medio electrolítico y una membrana separadora que permite el flujo iónico. Las baterías de flujo son sistemas electroquímicos recargables que acumulan energía en el electrolito que fluye a través de ellas [13]. Los electrolitos son almacenados en tanques externos, uno para el anolito y otro para el catolito. Cuando el electrolito abandona la celda, contiene iones con diferentes estados de oxidación debido a las reacciones redox.

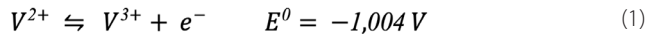
Dentro de las baterías de flujo se encuentran las baterías de flujo redox de vanadio (BFRV). Una de las ventajas que tienen las BFRV frente a otros diseños es que utilizan el mismo electrolito para ambas semiceldas, minimizando la contaminación entre especies y aumentando la vida útil de la batería [13]. Este mecanismo se fundamenta en los cuatro estados de oxidación del vanadio:  $V^{2+}$ ,  $V^{3+}$ ,  $V^{4+}$  y  $V^{5+}$ ; particularmente, cada uno de ellos tiene un color diferente [10] (Fig. 1).



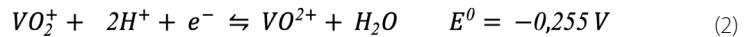
**Figura 1.** Estados de oxidación del vanadio y sus colores.

Las reacciones químicas que describen el funcionamiento de las BFRV son:

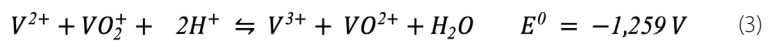
Ánodo



Cátodo

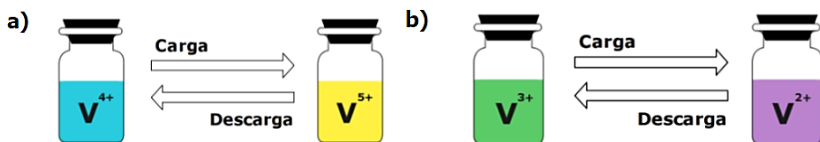


Reacción total



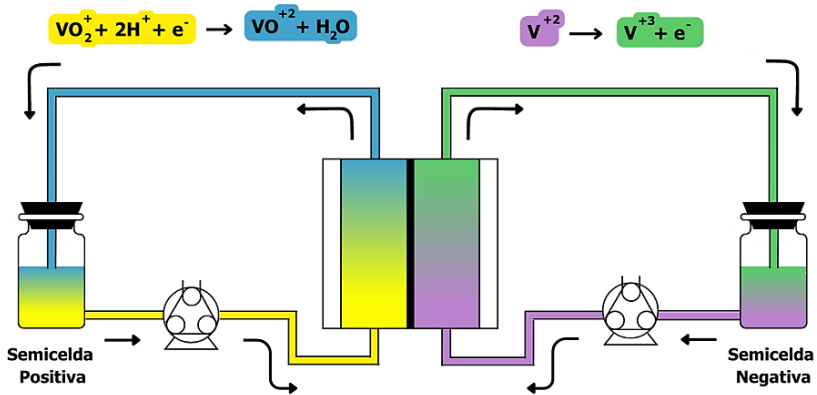
Para efectos de este trabajo, se referirá a las especies  $VO_2^+$  y  $VO^{2+}$  como  $V^{5+}$  y  $V^{4+}$ , respectivamente, por los estados de oxidación del vanadio involucrados en cada uno. Para los iones restantes, se mantiene la notación  $V^{2+}$  y  $V^{3+}$ .

En las BFRV, las reacciones son reversibles; en esto se basan los procesos de carga y descarga. Cuando la batería recibe energía, los electrones van del cátodo al ánodo, es decir, el  $V^{3+}$  se reduce para ser  $V^{2+}$  en el anolito y el  $V^{4+}$  se oxida para ser  $V^{5+}$  en el catolito. Cuando la batería entrega energía (descarga), el sentido de las reacciones se invierte, al igual que las condiciones de oxidación y reducción, para que los electrones vayan del ánodo al cátodo (Fig. 2).



**Figura 2.** Cambio del electrolito en semiceldas (a) Positiva y (b) Negativa.

Cuando la batería está en funcionamiento, los electrolitos son bombeados estequiométricamente desde sus reservorios hacia la celda. Cada uno entra en contacto con su respectivo electrodo y ocurren las reacciones redox (sea de carga o descarga) en la superficie de cada electrodo (Fig. 3). Posteriormente, los electrolitos salen de la celda hacia sus reservorios correspondientes; las únicas interacciones entre anolito y catolito son el intercambio protónico a través de la membrana y el intercambio de electrones a través de los colectores de corriente, para que los electrolitos se mantengan eléctricamente neutros [10].



**Figura 3.** Diagrama de funcionamiento de la BFRV en el proceso de descarga. [10].

### Variables influyentes

La conversión de iones de vanadio en las semiceldas ocurre hasta que la batería alcanza su estado de carga deseado. El estado de carga (SoC por sus siglas en inglés *State of Charge*) es la relación entre la energía almacenada en un momento dado y la máxima energía que es capaz de contener [10]. Para el proceso de carga, donde el  $\text{V}^{3+}$  se reduce a  $\text{V}^{2+}$  en el anolito y el  $\text{V}^{4+}$  se oxida a  $\text{V}^{5+}$  en el catolito, partiendo de la suposición de que ambos almacenan la misma cantidad de energía en un mismo momento, el estado de carga se rige por la siguiente ecuación [14]:

$$\text{SoC} = \left( \frac{C_{\text{V}^{2+}}}{C_{\text{V total}}} \right) = \left( \frac{C_{\text{V}^{5+}}}{C_{\text{V total}}} \right) \quad (4)$$

SoC representa el estado de carga (%),  $C_{\text{V}^{2+}}$  y  $C_{\text{V}^{5+}}$  es la concentración de iones  $\text{V}^{2+}$  y  $\text{V}^{5+}$  en sus electrolitos correspondientes (M) y  $C_{\text{V total}}$  es la concentración inicial de vanadio (M). Cuando todos los iones ya se encuentran en estos estados de oxidación, la batería está cargada completamente y su SoC es 100 %.

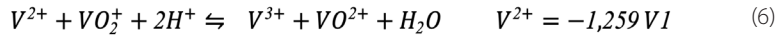
En este tipo de sistemas, la potencia que pueden entregar y su capacidad para almacenar energía son independientes entre sí; por lo que son sistemas altamente escalables [15].

La potencia depende de la diferencia de potencial y la corriente de salida de la batería, que a su vez varían en función de otros factores. En su caso, la tensión o voltaje de circuito abierto (OCV por sus siglas en inglés, *Open Circuit Voltage*) de cada celda de la batería se define por la ecuación de Nernst aproximada, utilizando concentraciones molares en vez de los coeficientes de actividad [16].

$$V_{\text{celda}} = V^0 + \frac{RT}{F_1} \ln \ln \left( \frac{|C_{\text{V}^{2+}}| |C_{\text{V}^{5+}}|}{|C_{\text{V}^{3+}}| |C_{\text{V}^{4+}}|} \right) \quad (5)$$



Donde  $V_{celda}$  es la diferencia de potencial a la salida de cada celda (V),  $V^0$  es el potencial estándar, para estas reacciones es 1,26 V [17], como puede verse en las ecuaciones 1, 2 y 3,  $R$  es la constante universal de los gases (J/molK),  $T$  es la temperatura (K),  $F_1$  es la constante de Faraday (96485,33 C/mol) y  $C_i$  es la concentración de cada uno de los iones de vanadio (M). La diferencia de potencial a la salida de la batería se obtiene al multiplicar este  $V_{celda}$  por el número de celdas en el arreglo. Esta ecuación se aplica a la reacción final del proceso.



Otro método para obtener la diferencia de potencial es a partir de la ecuación de Nernst modificada, en función del estado de carga de la batería. Han et al. [14] reportaron que este método de estimación tiene un error del 5 % al 7 %, por lo que se considera confiable.

$$V_{celda} = V^0 + \frac{RT}{nF_1} \ln \left( \frac{SoC}{(1-SoC)} \right)^2 \quad (7)$$

La corriente que fluye a través de la batería depende del modo de operación en el que se encuentre: durante el proceso de carga, la corriente proviene de la fuente de energía a la que está conectada la batería, mientras que, durante la descarga, la corriente proviene del flujo de electrones generado por las reacciones redox [17].

En cambio, la capacidad de almacenamiento energético depende de la concentración inicial de vanadio en los electrolitos y el volumen de estos; esta relación está definida por las siguientes ecuaciones [8]:

$$\rho_{energia} = \frac{V_{celda} \cdot F_1 \cdot (SoC_{max} - SoC_{min}) \cdot C_{vtotal}}{3600} \quad (8)$$

$$E_{celda} = \frac{V_{electrolito}}{\rho_{energia}} \quad (9)$$

Donde  $\rho_{energia}$  es la densidad energética (Wh/L) y  $SoC_{max}$  y  $SoC_{min}$  son los estados de carga máximo y mínimo de operación, respectivamente.  $E_{celda}$  es la capacidad de almacenamiento energético (Wh) y  $V_{electrolito}$  es el volumen de electrolito necesario en cada semicelda (L).

El anolito y el catolito tienen la misma composición, por lo que la contaminación cruzada a través de la membrana se considera despreciable [18]. Ambas soluciones se preparan a partir de especies de vanadio disueltas en medio ácido, normalmente ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), y se les pueden agregar sustancias para mejorar su eficiencia, solubilidad y conductividad, como ácido clorhídrico (HCl) o ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) [8]. Las dos principales fuentes de vanadio para los sistemas de BFRV son el sulfato de vanadilo ( $VOSO_4$ ) y el pentóxido de vanadio ( $V_2O_5$ ), cada uno con sus ventajas y desventajas [10].

Otra variable importante del funcionamiento de las BFRV es la duración de sus ciclos de carga y descarga. Este es el tiempo que transcurre mientras la batería pasa de su  $SOC_{max}$  al  $SOC_{min}$  y viceversa, por lo que define el tiempo que podrá pasar la celda entregando energía [19]. Idealmente, el tiempo de carga es igual al de descarga y viene dado por López y Poma [5].

$$t_d = \frac{F_2 \cdot (C_v \text{ total} \cdot SOC_{max}) \cdot Vol_{electrolito}}{I} \quad (10)$$

Donde  $t_d$  es el tiempo de carga y descarga (h),  $F_2$  es la constante de Faraday (26,801 Ah/mol) e  $I$  es la corriente que circula por la batería (A).

Por otra parte, la circulación de electrolitos a lo largo de la BFRV es esencial. Este flujo debe ser uniforme, porque de esto depende tener una densidad de corriente constante en toda la celda [20]. Existen dos configuraciones principales para el flujo de los electrolitos, descritos por Kim [20]. (Ver Fig. 4).

- **Flujo a través o flow-through:** el electrolito fluye a través del electrodo poroso. La entrada de electrolito va directamente al electrodo y lo atraviesa sin un camino definido hasta llegar a la salida.
- **Flujo por superficie o flow-by:** el electrolito fluye a través de un canal definido y el electrodo se coloca de modo que su superficie quede en contacto con este canal de flujo; así el electrolito penetra parcialmente el electrodo para reaccionar, mientras circula por el conducto hasta salir de la celda.

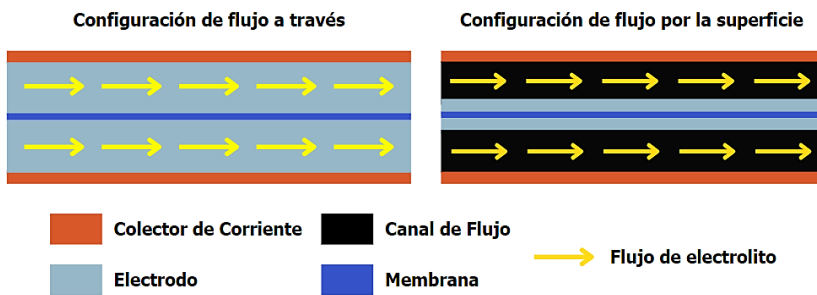
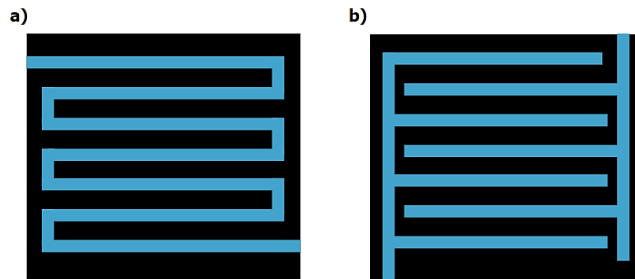


Figura 4. Configuraciones de flujo a través y por la superficie [20].

Los canales de flujo utilizados en el diseño *flow-by* tienen varias geometrías, entre las que resaltan (Ver Fig. 5):

- **Flujo en serpentin:** tiene una forma continua; la entrada y la salida del electrolito se conectan directamente por un canal en forma de serpentin [21].
- **Flujo interdigitado:** este diseño utiliza múltiples canales independientes (no interconectados), organizados en paralelo, con canales de entrada y salida de electrolito alternados y cerrados en uno de sus extremos [22]. El electrolito fluye desde los canales de entrada, se desplaza hacia el electrodo (donde ocurre la reacción química) y luego se redirige hacia los canales de salida. Sin embargo, este

proceso no permite un control preciso: el electrolito siempre tiende a tomar el canal de salida más cercano, evitando retroceder hacia los de entrada. Esto se debe a que los canales de entrada están permanentemente saturados con electrolito fresco, lo que genera una presión hidrodinámica que bloquea el flujo inverso.



**Figura 5.** Canales de flujo (a) en serpentin y (b) interdigitado. [21, 22].

La magnitud de este flujo se calcula siguiendo la Ley de Faraday de la electrólisis [23], adaptada al sistema de batería de flujo, donde el caudal es constante.

$$Q_{teórico} = \frac{I \cdot N_{celdas}}{n \cdot F \cdot C_V \cdot SoC_{min}} \quad (11)$$

En esta ecuación  $Q_{teórico}$  es el caudal mínimo de operación, (L/s),  $N_{celdas}$  es el número de celdas en el arreglo y  $n$  es el número de electrones transferidos (1 e<sup>-</sup>).

Este caudal es el mínimo que se debe aplicar a la celda bajo esas condiciones; sin embargo, no considera las pérdidas de presión, ni la absorción de electrolito que ocurre en los electrodos [4]. Estos factores dificultan el transporte de los iones a través de la celda, disminuyendo la eficiencia de la batería. Es por esto por lo que el caudal teórico se multiplica por un factor de escalamiento llamado lambda ( $\lambda$ ) para obtener un caudal real, capaz de contrarrestar estos efectos y mantener un flujo constante. Para las BFRV,  $\lambda$  está entre 4 y 8 [8]. A mayor  $\lambda$ , mejor es el aprovechamiento de los electrolitos [20].

$$Q_{real} = \lambda \cdot Q_{teórico} \quad (12)$$

En las BFRV, este fluido se almacena fuera de la celda y existen dos configuraciones en cuanto a su circulación [8]:

- **Con recirculación:** necesita dos reservorios de electrolito, uno para cada semicelda. Los electrolitos salen del tanque y son bombeados hacia la celda, donde reaccionan con su electrodo correspondiente, luego salen de la celda y regresan a su reservorio inicial. Este proceso continúa hasta que la batería alcanza el nivel de carga deseado.
- **Sin recirculación:** necesita 4 tanques de electrolito, dos para cada semicelda. El electrolito sale del tanque inicial hacia la celda y una vez ocurridas las reacciones,



sale hacia su tanque final; no se mezcla con el electrolito que no ha reaccionado. El nivel del tanque inicial disminuirá y el del tanque final aumentará conforme se carga o descarga la batería.

La relación entre el comportamiento ideal calculado y el realmente entregado por la batería en condiciones experimentales es la eficiencia. En las BFRV existen diferentes tipos de eficiencia [3], las cuales se presentan a continuación.

**Tabla 1.** Eficiencias de las BFRV.

Eficiencia	Ecuación	Variables
Eficiencia en voltaje	$\eta_V = \frac{V_d}{V_c}$ (13)	$V_d$ es el voltaje de descarga $V_c$ es el voltaje de carga
Eficiencia de carga	$\eta_c = \frac{Q_d}{QV_c}$ (14)	$Q_d$ es la carga eléctrica total de descarga $Q_c$ es la carga eléctrica total de carga
Eficiencia en energía	$\eta_E = \frac{E_d}{E_c}$ (15)	$E_d$ energía en el proceso de descarga $E_c$ energía en el proceso de carga
Eficiencia en potencia	$\eta_p = \frac{P_d}{P_c}$ (16)	$P_d$ potencia entregada en descarga $P_c$ potencia recibida en carga

No solo se deben tomar en cuenta las ecuaciones que rigen el funcionamiento de la batería, sino también los fenómenos electroquímicos que perjudican su rendimiento y alejan su comportamiento de la idealidad [4].

- **Pérdidas de presión:** se dan por el cambio de la sección de flujo entre las tuberías y el electrodo [24]. El área del canal de flujo es más pequeña que la del electrodo, por lo que el fluido pierde fuerza en su desplazamiento. Esto afecta la eficiencia de la batería, porque la bomba debe trabajar más para contrarrestarlo.
- **Resistencia del electrolito:** ocurre por la interacción entre los iones disueltos en el electrolito [4]; como todos tienen cargas positivas, se repelen entre sí y obstaculizan su movimiento hacia la membrana. A mayor resistencia, menor diferencia de potencial, por lo que disminuye la eficiencia de la batería.
- **Polarización de la concentración:** se refiere al gradiente de concentración que existe en el electrolito durante las reacciones; la concentración de iones que cambiaron su estado de oxidación será mayor cerca del electrodo, y menor a medida que el electrolito llega a los tanques de reserva [4]. Esto ocurre gracias a la diferencia entre la velocidad de reacción y la velocidad de flujo del electrolito [14]. Esto es perjudicial porque ocasiona un desbalance dentro de la celda.
- **Oxidación del anolito:** el ion  $V^{2+}$  tiende a oxidarse rápidamente en presencia de aire, lo que disminuye su concentración y altera la composición del anolito, ocasionando un desbalance de la celda [24].



- **Impacto del medio ácido:** como los electrolitos utilizados en este tipo de sistemas son de carácter ácido, se deben utilizar materiales resistentes ante estas condiciones para evitar la corrosión y el deterioro en los tanques, tuberías y cualquier otro componente que se encuentre en contacto directo con los electrolitos [4].

Todos estos fenómenos contribuyen a la pérdida de energía dentro de la batería por efectos internos, llamada autodescarga. Estos procesos son inherentes al funcionamiento de las BFRV, por lo que se pueden tomar precauciones en el diseño para poder minimizar sus efectos [4].

## METODOLOGÍA

El marco metodológico de este trabajo se estructuró en varias fases. Primero, se realizó una investigación documental, revisando tesis y artículos científicos para establecer una base teórica sólida, enfocada en el diseño de baterías de flujo redox de vanadio (BFRV) como herramienta práctica. La investigación es descriptiva, ya que detalla los criterios de diseño, componentes y condiciones de operación, con un enfoque cuantitativo basado en mediciones empíricas en laboratorio. Tiene un propósito aplicado, orientado a resolver problemas concretos en el diseño de prototipos de baterías, con impacto en la sociedad y la industria. Se recopilaron datos de fuentes primarias y secundarias, y se realizaron análisis cualitativos y cuantitativos para evaluar tecnologías y enfoques actuales. La investigación exploratoria permitió identificar nuevas áreas de oportunidad en el diseño de BFRV.

### Criterios de diseño y variables de estudio

Se identificaron las magnitudes físicas y químicas de interés para estudiar la batería, categorizadas en variables a controlar, a medir y a calcular.

Para el diseño de la batería, se establecieron las siguientes suposiciones:

- Las únicas reacciones que se llevan a cabo en el sistema son las redox que rigen el funcionamiento de la batería. Las reacciones secundarias, como la evolución de hidrógeno y oxígeno y la hidrólisis del  $V^{4+}$ , se consideran despreciables [10]. Tampoco se consideran los coeficientes de transferencia de masa ni las cinéticas de las reacciones, asumiendo un comportamiento ideal y completo [25].
- El fluido es incompresible, diluido y de concentración uniforme [15].
- Las características de la membrana y de los electrodos son isotrópicas [26].
- La membrana está completamente en contacto con el electrolito y solo permite el paso de protones. La contaminación entre electrolitos se considera despreciable en el modelo de cálculo [15].
- Es una celda balanceada; el estado de carga en ambos reservorios es igual en todo momento [27].



- El efecto del calor generado por las reacciones en la celda es despreciable al considerar la temperatura de la batería [24].

En función de estas condiciones, los criterios identificados y la comparación de 12 prototipos propuestos en la literatura con aplicaciones similares a las de este trabajo, se determinaron las características del prototipo diseñado.

## Diseño y dimensionamiento de la batería

Se determinaron los materiales y dimensiones del prototipo en función de los valores utilizados en diferentes prototipos de la literatura, seleccionando las opciones más apropiadas. Se priorizó el contexto académico y se favorecieron los materiales transparentes para analizar los estados de oxidación del vanadio. Los sensores fueron seleccionados en función de las variables de estudio especificadas y los rangos operativos característicos en sistemas BFRV a escala de laboratorio.

## Propuesta y simulación del sistema de control

Se aplicó la nomenclatura del Estándar Nacional Americano (ANSI/ISA-5.1-2024) para elaborar el diagrama P&ID del sistema, detallando la ubicación de sensores y actuadores en relación con el dispositivo controlador. La elección del controlador se basó en el número total de entradas y salidas digitales y analógicas requeridas, seleccionando un dispositivo con capacidades superiores para futuras expansiones. El circuito propuesto se diseñó con Fritzing (Fritzing GmbH), un programa de diseño electrónico y creación de prototipos de código abierto. La simulación de la BFRV se ejecutó en MATLAB® (The MathWorks, Inc.) mediante un modelo desarrollado a partir de ecuaciones fundamentadas en investigaciones previas, ajustado a los rangos específicos del prototipo. Se incorporaron gráficos para analizar el comportamiento de las variables en función de sus variaciones.

## Diseño del prototipo

El modelo de cada pieza de la celda, así como el montaje completo, se realizó en el programa Fusion 360® (Autodesk, Inc.), tomando como base la configuración y dimensiones previamente establecidas. En el modelo se especifican el material y las dimensiones de cada componente.

## Criterios de diseño

Los criterios considerados, así como las especificaciones para el prototipo de BFRV diseñado, se describen en la tabla 2.

**Tabla 2.** Criterios fundamentales para el diseño de una BFRV.

	Criterios	Especificación
<b>Electroquímicos</b>	Número de celdas en el arreglo	1
	Área de los electrodos (cm <sup>2</sup> )	6 - 12 - 24
	Tipo de membrana iónica	NR212
	Rango del estado de carga	20 a 95 %
	Composición del electrolito	VOSO <sub>4</sub> 0,5 a 2 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 3 M
<b>Mecánicos</b>	Volumen del electrolito (mL)	50 a 250
	Tipo de flujo del electrolito	Flujo "en superficie" en serpentín
	Presencia de sistema de recirculación	Sí

Los criterios electroquímicos se enfocan en garantizar que las reacciones redox alcancen un rendimiento óptimo según la aplicación de la batería. Para ello, se analizó el número de celdas en función de la diferencia de potencial requerida en el sistema [28]. Dado que el prototipo debe satisfacer una demanda específica, se decidió implementar una única celda.

El segundo criterio fue el área de los electrodos, los cuales representan los sitios activos de la BFRV. Tiene un impacto directo sobre la forma en la que la batería se comporta frente a la corriente eléctrica que recibe o entrega [29], a través de la densidad de corriente que experimenta la batería. Se propuso el uso de tres tamaños de electrodos diferentes: 6 cm<sup>2</sup>, 12 cm<sup>2</sup> y 24 cm<sup>2</sup> con la intención de estudiar el efecto de la variación del área de los electrodos en el funcionamiento de la celda. Estos tres tamaños se mantienen en los rangos utilizados en las investigaciones realizadas y permiten estudiar qué ocurre al duplicar o reducir a la mitad el área de los electrodos.

En cuanto al tipo de membrana iónica, se consideró la propuesta de Belmonte y Grespan [6]: la membrana NR212 de la marca Nafion® [30], ya que es la que mejor cumple con los parámetros establecidos para prototipos a escala de laboratorio, destacando por su alta selectividad iónica y su mayor accesibilidad económica.

Como fue definido anteriormente, el SoC va desde el 0 % (completamente descargada) hasta el 100 % (completamente cargada) en un comportamiento ideal. Sin embargo, la autodescarga y los demás fenómenos perjudiciales hacen que su comportamiento se aleje de la idealidad. Por lo tanto, se establece un rango de operación del SoC, en el cual se sepa que los resultados obtenidos son confiables y se preserve la integridad de los electrolitos [2]. Schofield y Musilek [17] aseguran que la estimación a partir del OCV es confiable hasta el estado de carga 20 %. A valores menores, el comportamiento del OCV puede ser fluctuante y la medición no sería fiable. El límite máximo se suele fijar en 80 %, pero en montajes experimentales se ha extendido hasta el 95 % [13]. Cargar la batería al 100 % puede aumentar los efectos de la polarización de la concentración, por lo que no es recomendado [14]. En resumen, se fija el límite mínimo del SoC al 20 % y el máximo al 95 %, con la posibilidad de cortarlo en 80 % u otro valor, según el montaje experimental.



Otro de los parámetros fue la composición del electrolito a utilizar, partiendo de la fuente de vanadio, sea  $V_2O_5$  o  $VOSO_4$ . Para Lourenssen [31], la decisión radicó en la importancia de variar la concentración de vanadio en los electrolitos para la aplicación de la BFRV. Si se quiere mantener una concentración fija, es mejor utilizar  $V_2O_5$  por su menor costo, pero si se quieren utilizar diferentes concentraciones de vanadio en la celda, es mejor utilizar  $VOSO_4$  por su mayor solubilidad en  $H_2SO_4$ , que es el electrolito de apoyo por excelencia en estos sistemas [32]. Dada la aplicación académica que tendrá el prototipo, cambiar la concentración es un requerimiento importante, por lo que se propuso el uso de  $VOSO_4$  como fuente de vanadio para los electrolitos.

No se estableció una concentración fija; en su lugar, se definió un rango de 0,5 a 2 M, basado en investigaciones previas, con el fin de analizar su efecto en el comportamiento de la batería. La concentración de ácido sulfúrico se fijó en 3 M, ya que es la más utilizada con estas concentraciones de vanadio. No obstante, esta concentración puede modificarse según las condiciones del montaje.

El ion  $SO_4^{2-}$ , presente tanto en el  $VOSO_4$  como en el ácido, puede disminuir la solubilidad del vanadilo si la concentración de ácido aumenta excesivamente en relación con la del sulfato de vanadilo, comprometiendo así la eficiencia de la batería [33].

Asimismo, pueden añadirse otros aditivos como el HCl, el  $H_3PO_4$  u otras sustancias que puedan tener impactos positivos en el comportamiento de la celda, ya sea incrementando la conductividad del electrolito o aumentando su estabilidad a altas temperaturas [34], dependiendo de los objetivos del investigador y el diseño experimental.

Cabe destacar que esta mezcla es altamente corrosiva, por lo que los materiales a utilizar en las piezas de la celda que entren en contacto con el electrolito deben ser resistentes ante estas características.

Se eligió un rango de volúmenes de operación entre 50 y 250 mL de electrolito en cada tanque, para así tener un amplio rango de acción y poder realizar variaciones significativas en los montajes experimentales sin necesidad de cambiar los tanques de reserva de electrolito. La mayoría de los volúmenes utilizados en las investigaciones de referencia se encuentran en este rango, por lo que se considera acertado.

Por otra parte, los criterios mecánicos se relacionan con el sistema hidráulico de la batería y sus especificaciones. Para el tipo de flujo se consideraron las opciones de flujo a través (*flow-through* o FT) o flujo por la superficie (*flow-by*, o FB). Si bien la configuración FT presenta menos pérdidas de presión, la FB permite usar electrodos más delgados, por lo que genera menos pérdidas óhmicas y permiten una mejor transferencia de masa [20]. Además, el FB puede mitigar los efectos de la polarización de la concentración [4], a diferencia del FT. Por esto, se seleccionó utilizar una configuración FB.

El canal de flujo se propuso en la configuración de serpentín, dado que tiene mejores resultados en las celdas a escala de laboratorio, al disminuir en mayor medida los efectos de la resistencia del electrolito [4]. Además, este diseño incrementa la transferencia de masa a lo largo del electrodo, al poder distribuir mejor el electrolito [35]. Si bien se sabe que este tipo de placas implican mayores pérdidas de presión de bombeo, estas se mitigan al calcular el caudal real de la batería.



Para este diseño se implementará el modelo con recirculación, permitiendo que el electrolito pueda pasar más de una vez por los electrodos y asegurar que todos sus iones reaccionen según el proceso que se lleva a cabo en la batería (carga o descarga). Si bien el modelo sin recirculación permite que el nivel de cada tanque se utilice para estimar visualmente el SoC de la batería [2], se considera poco eficiente, ya que implica mayores costos, disponibilidad de espacio [31] y no se aprovecha todo el potencial del electrolito porque solo pasa por los electrodos una vez.

## Variables de estudio

Las variables de estudio más relevantes de las BFRV se categorizaron de la siguiente forma:

**Tabla 3.** Variables importantes en el sistema.

Variables relevantes del proceso		
Medibles	Controlables	Calculables
Conductividad	Temperatura	Concentración
Tensión	Caudal de electrolito	Estado de carga
Corriente de salida	Nivel de electrolito en los tanques	Eficiencia
Tiempo de carga y descarga		

**Tabla 4.** Rangos de operación de las variables más importantes

Variable	Rango de Operación
Conductividad	200 a 900 mS/cm
Tensión	0 a 1,7V
Corriente	0 a 3 A
Temperatura	10 a 40 °C
Caudal de electrolito	2 a 100 mL/min
Nivel de electrolito en los tanques	Nivel bajo: 50 mL
Concentración total de vanadio	0,5 a 2 M
Concentración de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3 M
Estado de carga	20 % a 95 %

## Variables medibles

La conductividad, esencial en el estudio de BFRV, varía entre 200 y 500 mS/cm en electrolitos de vanadio, llegando a 900 mS/cm con cambios en la concentración de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y vanadio [4]. Una mayor conductividad mejora la eficiencia de la celda al reducir



la resistencia. Puede usarse como variable experimental para estimar el SoC, ya que varía linealmente durante carga/descarga [7]. La tensión y corriente directamente determinan la potencia de salida, caudal, tiempo de carga/descarga y estado de carga. La diferencia de potencial en BFRV oscila de 0 V (descargada) a 1,7 V [14]. Para el diseño propuesto, se sugiere corriente directa de 0 a 3 amperios. El tiempo de carga/descarga, medible empíricamente, sirve como parámetro de referencia al observar el tiempo que tarda en alcanzar su máximo y mínimo voltaje.

## Variables controlables

La temperatura es crucial para controlar en las BFRV debido a su impacto en la solubilidad de las especies de vanadio en el  $H_2SO_4$  [2]. Por debajo de 10 °C, los iones  $V^{2+}$ ,  $V^{3+}$  y  $V^{4+}$  reaccionan y precipitan, mientras que, por encima de 40 °C, el  $V^{5+}$  precipita [36]. Una vez se inicia el proceso de precipitación, continúa hasta alcanzar el equilibrio [36], por lo que es crucial controlar la temperatura para evitar llegar a ese punto y preservar la integridad de los electrolitos. El caudal, como se mencionó previamente, minimiza impactos negativos como pérdidas de presión y polarización de concentración y carga en el electrolito, manteniendo la distribución homogénea de los iones [2]. Controlar y ajustar en tiempo real el caudal según el rendimiento de la celda es de interés académico. Se establece un rango de caudales de operación entre 2 y 100 mL/min, considerando un factor de escalamiento entre 6 y 8, ajustable según las preferencias del usuario y el diseño. En un sistema de recirculación cerrado con caudal constante, el nivel de electrolitos debería ser constante. No obstante, se debe monitorear para detectar fugas y pérdidas de presión. Un nivel superior al esperado indica insuficiente bombeo del electrolito.

## Variables calculables

La concentración de iones de vanadio en electrolitos es vital para entender el funcionamiento de BFRV, pero medirla resulta complejo y la espectrofotometría fue descartada según Patiño [2]. No se encontró otro método confiable para medirla sin perturbar el sistema, por lo que no se considera medible en el prototipo. En cambio, la concentración puede estimarse a partir del estado de carga de la batería, calculado mediante el voltaje de circuito abierto según Han et al. [14]. Otro método es la estimación del SoC a través de la conductividad [7] o cualitativamente mediante el cambio de color de los electrolitos [24]. Se considera el cálculo de la eficiencia de la batería, comparando valores teóricos y experimentales al construir el prototipo. Calcular diferentes eficiencias permite analizar el rendimiento y realizar ajustes para optimizarlo.

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## Piezas y componentes del prototipo

En función de la investigación documental realizada, se muestran los componentes del sistema completo de BFRV, con sus respectivas dimensiones y materiales (tablas 5 y 6).

**Tabla 5.** Materiales y modelos de los componentes del prototipo.

Componente	Material / Modelo
Electrodos	Filtro de carbono
Marcos de los electrodos	Goma Viton
Coletores de corriente	Láminas de cobre y grafito flexible
Canales de flujo	Placas de grafito
Placas terminales	Acrílico
Tanques de electrolito	Vidrio
Bombas	Peristálticas
Tuberías	Silicona

**Tabla 6.** Dimensiones de las piezas de la celda según los tres tamaños de electrodos definidos.

Área de electrodo (cm <sup>2</sup> )	Dimensiones (cm)						
	Membrana	Serpentín	Colector de cobre	Colector de grafito	Placa del serpentín	Marcos de electrodos	Placas terminales
6	2,5 x 3,5	2 x 3	2 x 3	2,5 x 3,5			
12	3,5 x 4,5	3 x 4	3 x 4	3,5 x 4,5	8,5 x 10,5	8,5 x 10,5	8,5 x 10,5
24	4,5 x 6,5	4 x 6	4 x 6	4,5 x 6,5			

## Electrodos

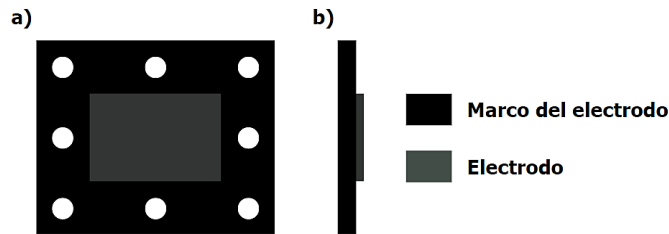
Los electrodos en las BFRV deben tener alta conductividad eléctrica y ser porosos para maximizar el área activa y facilitar el flujo de electrolitos [8]. El filtro de carbono es común debido a su adecuación a estas características y su economía. No obstante, el papel de carbono ha llamado la atención por su menor resistencia óhmica [35]. Se propone el uso de fieltro de carbono de 3,175 mm de grosor para este diseño, dentro del rango típico de 3 a 5 mm. El tamaño de los electrodos influye en las dimensiones de la membrana, colectores de corriente y canales de flujo. Se proponen tres tamaños adecuados, pero el sistema de recirculación y las placas externas son reutilizables para todos los tamaños de electrodos sin modificaciones.

## Marcos para los electrodos

La compresión de electrodos tras el ensamblaje de la celda es crucial para reducir las pérdidas de presión [21]. Se utilizan marcos de grosor menores al del electrodo, donde el fieltro se coloca y se comprime al grosor del marco al apilar las piezas [24]. Los marcos



permiten la utilización de papel de carbono, colocándolo dentro y apilándolo según el grosor deseado [37]. El diseño sigue el criterio de Becker y Turek [38] para lograr una compresión del 20 % en los electrodos, estableciendo un grosor de marco de 2,5 mm. Las dimensiones de los marcos se ajustan a cada área de electrodo propuesta. Se consideran dos materiales para los marcos: plástico (PTFE o Teflón®) y goma (silicona y Viton®). Se opta por el fluoroelastómero Viton debido a su resistencia a medios ácidos y capacidad para sellar sistemas y evitar fugas [39, 40]. (Fig. 6).



**Figura 6.** Relación entre los electrodos y sus marcos, vista frontal (a) y lateral (b).

## Placas de flujo

Se sugiere el uso de bloques bipolares de grafito para construir los canales de flujo, en contraposición al policloruro de vinilo (PVC) utilizado por algunos investigadores [41], ya que la capacidad conductiva de los bloques de grafito facilita el flujo de electrones hacia los colectores de corriente [10]. El diseño del serpentín sigue el modelo de Zhong y Chu [24], con cada nivel del serpentín y canal de flujo teniendo un área transversal de 3 mm, coincidiendo con el diámetro interno de las tuberías. Cada canal de flujo dispone de dos boquillas para la entrada y salida del electrolito, y el área del serpentín se ajusta a la del electrodo, garantizando dimensiones uniformes en las tres configuraciones propuestas.

## Colectores de corriente

Los colectores de corriente, conectores eléctricos de ambas semiceldas que facilitan el flujo de corriente, actúan como terminales celulares. La elección común es el cobre laminado, a menudo combinado con otro material (chapa de oro o grafito flexible) para reducir la resistencia de contacto con el bloque de grafito. Este diseño propone la combinación de láminas de cobre y grafito flexible, con este último colocado entre la lámina de cobre y el bloque bipolar de grafito de las placas de flujo [29]. El área de los colectores de cobre debe igualar la de los electrodos, mientras que la lámina de grafito debe tener un área ligeramente mayor. (Tabla 6).

## Placas terminales / de extremo

Las placas terminales, esenciales para mantener todas las piezas presionadas entre sí mediante tornillos, deben ser resistentes al medio ácido de los electrolitos para prevenir fugas [5]. Este diseño opta por placas de extremo de polimetilmetacrilato, PMMA o Plexiglas® [42] en lugar de PVC utilizado en otros diseños eficientes, eligiendo Plexiglas



por su transparencia [3]. Aunque las placas no entran en contacto con el electrolito en el montaje original, podrían usarse para pruebas focalizadas en el canal de flujo para observar el flujo del electrolito. Las dimensiones propuestas son de 105 mm x 15 mm x 85 mm (tabla 6).

## Bombas

Las bombas peristálticas son idóneas para sistemas de recirculación de BFRV debido a su resistencia a medios ácidos, ya que el fluido no entra en contacto con el mecanismo de la bomba, sino solo con las tuberías [2]. Se sugiere el uso de dos bombas peristálticas EZO-PMP® de Atlas Scientific [43], una para cada semicelda. Con un rango de 0,5 mL/min a 105 mL/min, se cubre adecuadamente el espectro de operación requerido. Esta bomba ofrece alta precisión de bombeo ( $\pm 1\%$ ) y diversos modos de operación, destacando la capacidad de bombeo con un caudal y tiempo definido por el usuario. Este último permite ajustar electrónicamente el flujo mediante un controlador, adaptándose así a cada configuración experimental.

## Tuberías

Las conexiones del prototipo deben ser capaces de resistir medios ácidos corrosivos, por lo que se prefieren tuberías poliméricas como PVC o silicona para este tipo de instalaciones [2].

Se sugiere el uso de conexiones de silicona Atlas Scientific de 3 mm de diámetro interno, diseñadas para ser compatibles con la bomba seleccionada y aptas para entornos ácidos [44], considerándose la opción óptima.

## Tanques / reservorios

Los tanques del sistema de recirculación deben ser resistentes a medios ácidos y herméticos para prevenir la oxidación del anolito al entrar en contacto con el aire [22]. Comúnmente, en BFRV a escala de laboratorio se emplean tanques de vidrio o polietileno, optándose por el vidrio para facilitar la observación del cambio de color en los electrolitos. Se busca una geometría cuadrada o rectangular para asegurar caras lisas y un adecuado funcionamiento del sensor de nivel, idealmente con escalas graduadas para medir visualmente el nivel de electrolito. Las tapas deben ser de un material resistente al medio ácido, como el polietileno, en caso de fuga. Se propone el uso de recipientes de vidrio de 250 mL con geometría rectangular y tapas de polietileno, permitiendo almacenar completamente el máximo volumen permitido por el diseño.

## Sensores

En función de las variables medibles y controlables determinadas y sus rangos de operación (tablas 3 y 4), se seleccionaron los sensores necesarios (tabla 7); sus características se explican a continuación.

**Tabla 7.** Sensores incluidos en el diseño del prototipo.

Variable	Sensor
Conductividad	Sensor de conductividad K10 Platino
Tensión	Sensor de tensión FZ0430
Corriente	Sensor de corriente ACS712
Tiempo de carga y descarga	Arduino
Temperatura	Sensor de temperatura LM335
Caudal de electrolito	Bomba peristáltica EZO-PMP
Nivel de electrolito en los tanques	Sensor de nivel sin contacto XKC-Y25-PNP

### Sensor de conductividad

Es necesario utilizar un sensor de conductividad de amplio espectro que cubra el rango teórico de los electrolitos (Tabla 4) para medir diversas composiciones electrolíticas.

La medición no busca determinar directamente la concentración de iones en un momento dado, sino proporcionar una referencia para observar las variaciones en función del estado de carga de la batería, ya que un mayor estado de carga se correlaciona con una mayor conductividad [7]. El sensor de conductividad EZO® de Atlas Scientific, modelo K10 [45], fue seleccionado por su rango de medición de 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 1  $\text{S}/\text{cm}$ , lo que permite registrar variaciones significativas en la conductividad. Con una precisión del 2 % y resistencia a medios ácidos, se considera adecuado para este diseño. Se incluyó un sensor en cada tanque de electrolito para medir en tiempo real tanto el anolito como el catolito de manera independiente. A pesar de ser un instrumento costoso (226\$ cada uno), se justifica su elección debido a su resistencia a medios ácidos y amplio rango de medición, lo que permite su utilización en diversos montajes experimentales y garantiza resultados más precisos y representativos.

### Sensor de tensión y sensor de corriente

El sensor de tensión medirá la diferencia de potencial, mientras que el sensor de corriente se encargará de medir la corriente durante los procesos de carga y descarga.

Ambos estarán conectados a los colectores de corriente de cobre, los cuales no estarán en contacto con los electrolitos, evitando así la degradación en medio ácido. Se ha elegido el sensor FZ0430 para medir la diferencia de potencial, con un rango de 0.0245 V - 25 V y la sensibilidad necesaria para reportar valores de tensión de la batería, teóricamente entre 0V y 1.7V [17]. En cuanto al sensor de corriente, se opta por el ACS712



de Allegro Microsystems [46], con un rango de 0 a 5 A. Tiene la sensibilidad y precisión suficientes (1,5 % a 25 °C) para registrar pequeños cambios en la corriente aplicada a la celda, que está limitada entre 0 y 3 A. Además, presenta una baja resistencia interna de 1,2 mΩ, lo que minimiza la pérdida de energía, y una rápida respuesta con un tiempo de subida de salida de 5 μs ante una corriente de entrada escalonada.

## Tiempo de carga

El tiempo de carga y descarga puede medirse utilizando la función millis() en microcontroladores como Arduino® UNO [47], sin necesidad de un sensor independiente. Este método permite contar el tiempo que transcurre entre condiciones específicas, utilizando los voltajes teóricos de la batería en sus estados de carga máxima y mínima previamente establecidos. Se registra el tiempo transcurrido desde que la batería alcanza el voltaje mínimo hasta el máximo, o viceversa, proporcionando de manera empírica los tiempos de carga y descarga.

## Sensor de temperatura

Se eligió el sensor LM335 de Texas Instruments [48] por su precisión (1 °C) y rango de operación de -40 °C a 100 °C, adaptándose al rango operativo típico de las BFRV (10 a 40 °C), facilidad de calibración (10 mV/°K), baja impedancia dinámica (<1 Ω) y corriente de operación entre 400 μA a 5 mA. Su función es supervisar la temperatura de la celda para evitar la precipitación de sustancias no deseadas en los electrolitos. Los parámetros de control generan alertas visuales 5 °C antes de los límites (15 y 35 °C), indicando al usuario tomar medidas preventivas. Si se alcanzan los límites (10 y 40 °C), la bomba se apaga para preservar los electrolitos, requiriendo reinicio manual. Dada la amplia capacidad del sensor, los límites pueden ajustarse según las condiciones experimentales.

## Caudal de electrolito

El caudal del electrolito se controla mediante medidores de flujo y electroválvulas, pero las bombas peristálticas propuestas (EZO-PMP) ofrecen regulación electrónica precisa, eliminando la necesidad de válvulas y medidores de flujo. Estas bombas no solo recirculan el electrolito, sino que también permiten variar y conocer el caudal en tiempo real.

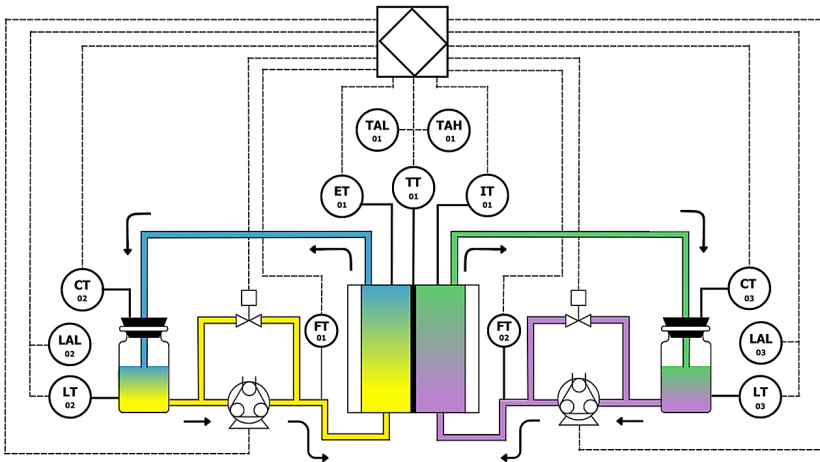
## Sensor de nivel

Se eligió el sensor de nivel de líquido sin contacto XKC-Y25-PNP de Think Electronics [49] con tiempo de respuesta de 500 ms, ubicado externamente al tanque y sin contacto directo con el electrolito, evitando deterioro en medio ácido. Detecta la presencia de líquido por variaciones en el campo eléctrico. Su instalación permite cambios de posición sin afectar al sistema. Se coloca para detectar niveles menores a 50 mL. En caso de ocurrir, se apagan las bombas y se detiene la batería para revisar posibles fugas.

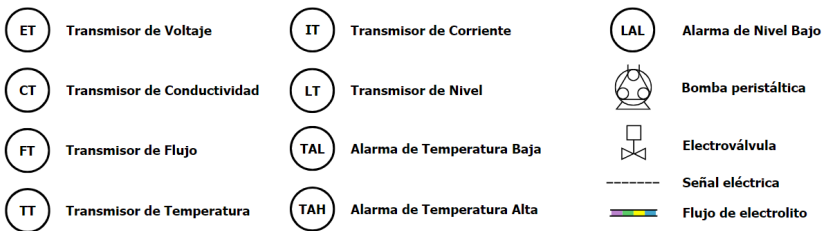
## PROPUESTA Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

### Diagrama P&ID

Se diseñaron los diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID por sus siglas en inglés *Piping and Instrumentation Diagram*) para este sistema. En estos diagramas se representan todos los instrumentos de medición y control que se incluyen dentro del sistema, así como las tuberías por donde pasa el fluido durante el proceso, ANSI [50]. (Figs. 7, 8, 9)

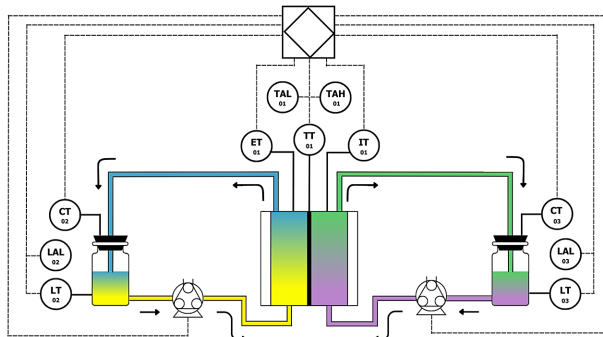


**Figura 7.** Diagrama P&ID con válvulas.



**Figura 8.** Leyenda para los diagramas P&ID.

El sistema propuesto implica la recirculación simétrica y cerrada del electrolito entre tanques y semiceldas. Sensores de temperatura, corriente y tensión transmiten datos al controlador Arduino UNO (lazo 1). El Arduino toma decisiones, como apagar bombas, para garantizar la seguridad del equipo y usuarios. Cuatro alarmas visuales indican niveles bajos en tanques o temperaturas extremas. Se presentan dos diagramas: uno con electroválvulas y medidores de flujo, y otro sin, optando por este último para simplificar el sistema, ya que las bombas propuestas pueden gestionar estas funciones.

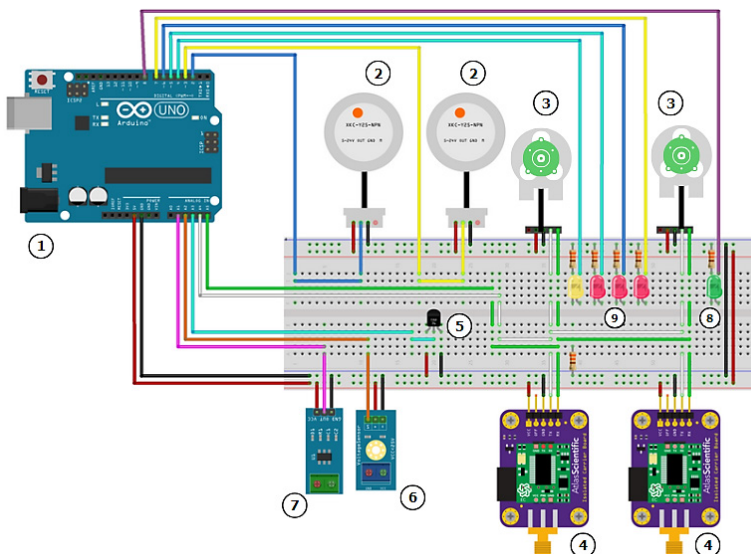


**Figura 9.** Diagrama P&ID sin válvulas.

### Conexión de los sensores

Según lo establecido en los requerimientos, este prototipo cuenta con 14 instrumentos de medición o control: 7 sensores y 7 actuadores; esto se traduce en 7 entradas de datos y 7 salidas. Los actuadores son las dos bombas peristálticas y cinco LEDs (con sus respectivas resistencias de 330Ω) que sirven como alarmas visuales e indicadores de estado.

Los sensores de conductividad y las bombas peristálticas se conectan al Arduino UNO utilizando el protocolo de comunicación serial I<sup>2</sup>C, que permite conectar varios periféricos a un mismo bus de datos del controlador principal de forma síncrona. El Arduino UNO cuenta con pines suficientes e incluso pines restantes, por lo que permite la instalación de nuevos sensores en un futuro, en caso de que se quieran agregar nuevas variables de estudio.



**Figura 10.** Propuesta de conexión del sistema de control y medición [47].



En la Fig. 10 se muestra el diseño de conexiones propuesto para el sistema, controlado con un Arduino UNO (1). Cada sensor de nivel (2) está conectado a un pin digital. Se observa que las bombas (3) y los sensores de conductividad (4) están conectados a los mismos 2 pines, correspondientes al SCL (*System Clock*) y al SDA (*System Data*) del Arduino, cumpliendo con el protocolo de comunicación I2C.

En las entradas analógicas del controlador están conectados los tres sensores globales: temperatura (5), voltaje (6) y corriente (7).

El LED verde indica el funcionamiento óptimo de la celda, mientras que los rojos y el amarillo representan alertas visuales. El LED amarillo alerta de temperaturas precautorias, y el rojo indica temperaturas críticas, apagando la celda para prevenir problemas. Los LEDs rojos señalan niveles bajos en tanques.

Las bombas peristálticas requieren una fuente de 12V-24V y se sugiere cableado apantallado para los sensores analógicos. El Arduino se conecta a una computadora mediante USB, permitiendo al usuario monitorear y guardar datos en Excel para análisis posterior.

## Simulación en MATLAB

Se desarrolló una simulación en MATLAB para calcular el rendimiento teórico de la batería en condiciones variables. El usuario puede especificar parámetros iniciales, como área de electrodo, concentración de vanadio, volumen de electrolito, corriente de carga y rango de estado de carga. La simulación calcula el tiempo de carga estimado, potencia, capacidad nominal y caudal teórico, con la opción de obtener el caudal real mediante un factor de escala. También muestra gráficamente la variación del estado de carga, voltaje y concentración de iones de vanadio en función del estado de carga. Incluye un módulo de comparación de variables para analizar el comportamiento de parámetros en función de otros.

Los gráficos presentados en este módulo son:

- Capacidad energética en función del volumen del electrolito a diferentes concentraciones de vanadio inicial.
- Capacidad energética en función de la concentración inicial de vanadio a diferentes volúmenes de electrolito.
- Densidad de corriente en función de la corriente de carga utilizando los tres tamaños de electrodo propuestos.

La simulación en MATLAB excluye la conductividad, al ser una variable experimental que requiere datos empíricos para su modelado. Los sensores de nivel no están representados, asumiendo un comportamiento ideal sin fugas de electrolito. En cambio, las alertas de temperatura y los indicadores de estado están incorporados en la simulación.

### BATERÍA FLUJO REDOX DE VANADIO

Hecho por: Laura de Jongh Salazar

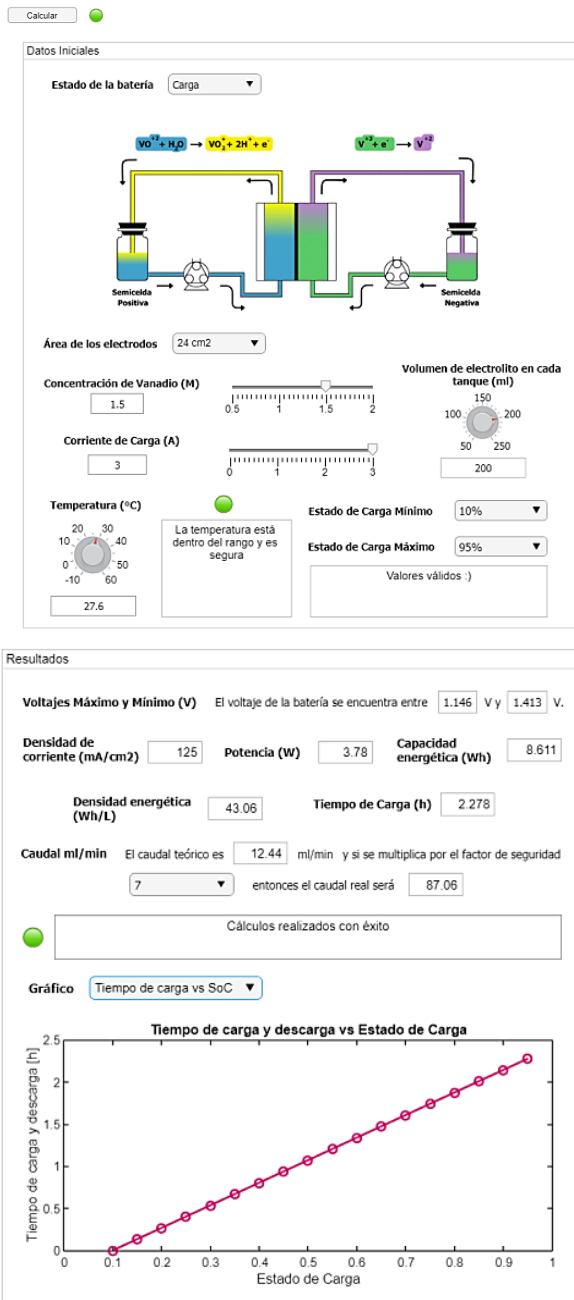
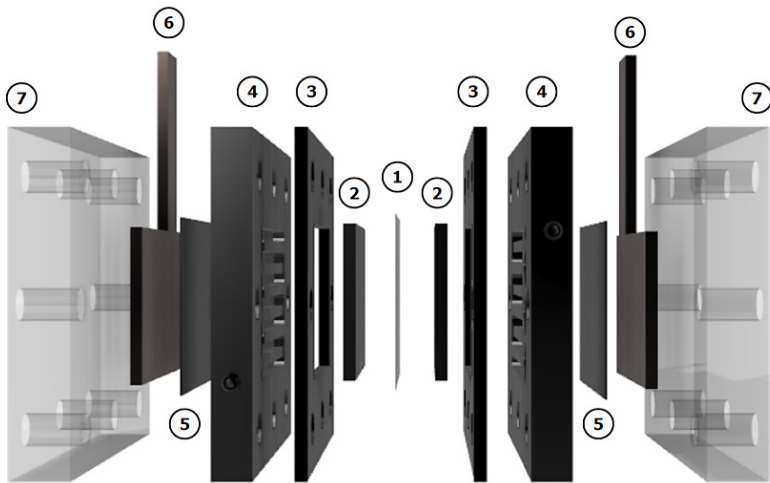


Figura 11. Captura de pantalla de la interfaz de la simulación en MATLAB sobre el funcionamiento de este prototipo.

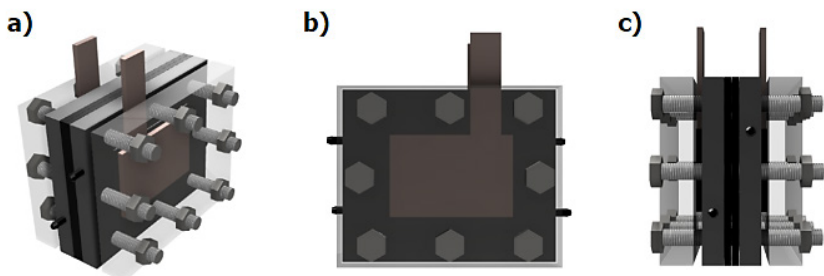
## Diseño final del prototipo

Se presenta el diseño final del prototipo de BFRV. La Fig. 12 muestra la estructura interna de la celda, con una membrana (1) que divide la celda en dos semiceldas iguales, electrodos (2) dentro de marcos (3), conectados a canales de flujo (4). Los electrones viajan a través de placas bipolares hacia colectores de corriente compuestos por láminas de grafito flexible (5) y cobre (6). Todo está contenido por placas terminales (7) unidas con tornillos, ensambladas concéntricamente.



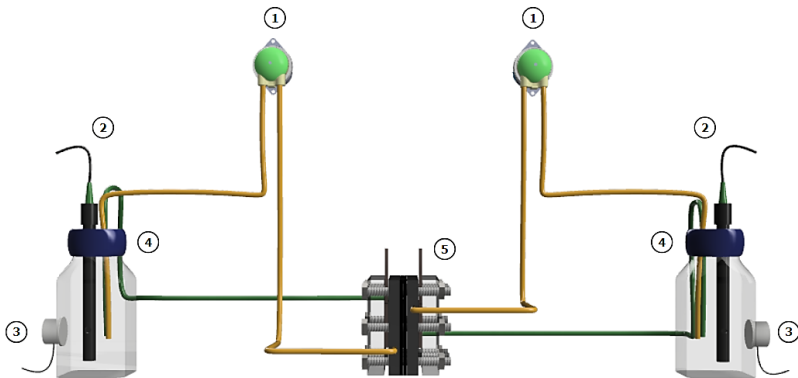
**Figura 12.** Detalle de los componentes internos del prototipo.

La celda ya ensamblada se puede ver en la Fig. 13. Sus dimensiones son 105 mm x 62.5 mm x 115.7 mm contando la altura de los colectores de corriente. Se utilizan 8 tornillos de 8 mm de diámetro y 75 mm de largo, con sus respectivas tuercas, para mantener las piezas unidas entre sí de forma segura. Las placas de flujo cuentan con dos boquillas cada una en sus extremos laterales: entrada y salida de electrolito.



**Figura 13.** Vista isométrica (a), lateral (b) y frontal (c) de la celda.

El montaje completo, incluyendo el sistema de recirculación del electrolito, se muestra en la Fig. 14. Ambas semiceldas cuentan con su bomba peristáltica (1), así como su respectivo sensor de conductividad (2) y sensor de nivel (3). También se observan los dos tanques de electrolito (4), desde los cuales salen las tuberías amarillas hacia las bombas peristálticas y luego hacia la celda (5); el electrolito después sale de la celda a través de las tuberías verdes hacia los tanques de nuevo, para ser recirculado.



**Figura 14.** Montaje completo del sistema.

Las tapas de los tanques contarán con los orificios para las tuberías de alimentación y retorno a la celda y para el sensor de conductividad; el tanque del anolito debe tener un orificio extra para la entrada de nitrógeno. La longitud de las tuberías dependerá del espacio disponible para realizar el montaje. Ghirlanda [10] recomienda que el sistema se instale en una superficie impermeable o capaz de contener el líquido en caso de alguna fuga de electrolito.

En la tabla 8, se representa una comparativa de celdas BFRV investigadas por diferentes autores.

**Tabla 8.** Tabla comparativa entreceldas de BFRV desarrolladas por diversos autores.

Autores	Área de los electrodos	Material de los electrodos	Grosor de los electrodos	Material de los colectores de corriente	Material de los marcos	Material de las placas terminales	Concentración de Vanadio y ácido	Caudal de electrolito	Volumen de electrolito en cada tanque	Forma del canal de flujo	Material del canal de flujo	Material de los tanques
De Jongh Salazar et al. (este trabajo)	6- 12 - 24	Fieltro de carbono	3,175	Cobre laminado	PTFE o Teflón®	PMMA o Plexiglas®	VOSO4 0,5 a 2 M H2SO4 3 M	2 a 100 ml/ min	50 a 250 ml	Serpentín	Bloques de grafito	Vidrio
Kumar & Jayanti [51]	100 cm <sup>2</sup>	Fieltro de carbono	6 mm comprimido a 4,5 mm	Láminas de cobre	Silicona	Acrílico	2 M VOSO4 5 M H2SO4	58 ml/min	80 ml	Serpentín e interdigitado	Bloques de grafito	-
Sun et al. [52]	5 cm <sup>2</sup>	Papel de carbono	0,4 mm	Láminas de cobre con chapa de oro	PTFE	Aluminio	1 M VOSO4 5 M H2SO4	-	-	Serpentín	Bloques de grafito	-
Al-Fetlawi [53]	100 cm <sup>2</sup>	Fieltro de carbono	4 mm	Acero inoxidable	PTFE	PVC	1 a 1,5 M VOSO4 4 M H2SO4	60 ml/min a 180 ml/min	250 ml	-	-	Vidrio
Lee et al. [54]	9 cm <sup>2</sup>	Fieltro de carbono	5 mm	Láminas de cobre	-	Aluminio	1,5 M VOSO4 3 M H2SO4	2 a 12 ml/ min	10 ml	-	Bloques de grafito	-
Song et al. [4]	28 cm <sup>2</sup>	Fieltro de carbono	4,4 mm y 5,2 mm comprimidos a 2 mm	Láminas de cobre y grafito	PTFE	PVC	0,5 a 1,7 M VOSO4 3 M H2SO4	40 ml/min a 45 ml/min	-	-	PVC	-
Hung et al. [55]	50 cm <sup>2</sup>	Fieltro de carbono	2,5 mm	Acero inoxidable	Viton	Acrílico	1,58 VOSO4 3 M H2SO4	-	100 ml y 200 ml	Serpentín	Bloques de grafito	-
Zheng et al. [56]	9 cm <sup>2</sup>	Fieltro de carbono	3 mm	-	-	Acero inoxidable	1,5 M VOSO4 3 M H2SO4	30 ml/min a 150 ml/min	60 ml	Paralelo	-	-
Patño [2]	25 cm <sup>2</sup>	Fieltro de carbono	-	Láminas de cobre con chapa de oro	Silicona	-	1,6 M VOSO4 3 M H2SO4	20 ml/min	205 ml	Serpentín	Bloques de grafito	Polietileno de alta densidad
Aaron et al. [57]	5 cm <sup>2</sup>	Papel de carbono	0,4 mm	Láminas de cobre con chapa de oro	-	-	1 M VOSO4 5 M H2SO4	20 ml/min	50 ml	Serpentín	Bloques de grafito	-
Al-Yasiri [41]	25 cm <sup>2</sup>	Fieltro de carbono	6 mm	Grafito	PVC	Garolite	1,04 M VOSO4 4 M H2SO4	35 ml/min	100 ml	Serpentín	Bloques de grafito y PVC	-
Ghirlanda [10]	25 cm <sup>2</sup>	Fieltro de carbono	10 mm	Láminas de cobre y grafito	Gomas de silicona	PTFE	0,15 a 0,3 M V2O5 6 M H2SO4	2,5 ml/min a 16 ml/min	200 ml	-	-	Vidrio
Roy [58]	4 cm <sup>2</sup>	Fieltro de carbono	5 mm	Láminas de cobre	-	Acero inoxidable	0,2 M VOSO4 1,25 M H2SO4	180 ml/min	-	Serpentín	Bloque de Grafito	-



## Fallas potenciales en el prototipo de BFRV y medidas mitigantes

Este resumen abarca los principales riesgos y sus soluciones para garantizar un mejor rendimiento del prototipo:

1. Desbalance de electrolitos: puede causar ineficiencias en el estado de carga (SoC). Se sugiere monitoreo constante del nivel de electrolito y ajustes automáticos en la recirculación.
2. Fugas de electrolitos: producidas por sellos defectuosos o conexiones deficientes. Se recomiendan pruebas de presión, uso de materiales resistentes y un sistema de detección de fugas.
3. Degradación de la membrana: reduce la eficiencia con el tiempo. Se mitiga con membranas de alta calidad, control de temperatura y pH, y mantenimiento regular.
4. Contaminación de los electrolitos: disminuye la conductividad. La solución es garantizar la pureza del electrolito y usar filtros en el sistema de recirculación.
5. Pérdida de capacidad con el tiempo: aumenta con los ciclos de carga. Se mitiga con mantenimiento preventivo y monitoreo del rendimiento cíclico.
6. Problemas mecánicos: fallas en bombas o válvulas pueden afectar la recirculación. Se recomienda monitorear estos componentes y realizar mantenimiento preventivo [59, 60, 61, 62].

## CONCLUSIONES

- El número de celdas, el área de los electrodos, el tipo de membrana a utilizar, la composición y cantidad del fluido, el tipo de flujo, el rango de SoC y la presencia de sistema de recirculación son los criterios que determinan el tamaño, la potencia y la capacidad energética de la batería.
- Las variables de estudio relevantes de las BFRV se pueden categorizar en variables a medir: conductividad, diferencia de potencial, corriente y tiempo de carga; variables a controlar: temperatura, volumen de electrolito y su caudal; y variables a estimar, que no pueden ser medidas empíricamente en un contexto experimental, como la concentración de iones de vanadio y el estado de carga.
- La configuración más eficiente para una BFRV a escala de laboratorio es utilizar una única celda con canales de flujo en forma de serpentin y un sistema de recirculación de electrolito. Al tener en cuenta el fin académico de este prototipo, se concluye que el  $\text{VO}_2$  es la fuente de vanadio óptima, por su alta solubilidad en comparación con las otras opciones.
- Este diseño es versátil y adaptable a las necesidades del investigador; permite utilizar tres tamaños diferentes de electrodos y variar la concentración de vanadio,



el volumen de electrolito y el caudal de recirculación, sin necesidad de cambiar todas las piezas de la batería.

- El sistema de monitoreo y control de variables de la batería, a través de un Arduino, permite obtener mediciones precisas y en tiempo real de las variables de estudio, facilitando la recolección de datos para su posterior análisis.
- El diseño propuesto tiene un costo aproximado de 1 025 \$. Si bien los sensores de conductividad aumentan el presupuesto, se demostró que esta es una variable de estudio importante porque permite estimar el SoC de forma más precisa, por lo que se recomienda su inclusión en el prototipo, a pesar del alto costo.
- Los resultados teóricos esperados de esta batería, obtenidos a través de la simulación en MATLAB, son acordes a su aplicación, por lo que se considera que la construcción de este prototipo en la Universidad Metropolitana es viable y pertinente.

Dado que el proyecto está en la fase de diseño experimental y enfocado en su implementación a nivel de laboratorio con fines educativos, no se ha realizado un análisis financiero detallado. Aunque incluir un estudio de VAN y TIR podría aportar una perspectiva económica relevante, especialmente al evaluar la escalabilidad futura del prototipo para aplicaciones industriales o comerciales, esto queda fuera de los objetivos iniciales del proyecto.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Escuela de Ingeniería Química y al Departamento de Energía y Automatización de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Metropolitana en Caracas, Venezuela, por proporcionar los medios necesarios.

## CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Investigación y tesis original: Laura de Jongh. Supervisión: José Barriola, tutoría: María Álvarez. Revisión y edición: Miguel Pérez.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores que aparecen en el artículo declaran que no existe ningún conflicto potencial de intereses relacionados con el mismo.

## REFERENCIAS

- [1] Rodríguez, J. (2021, 24 de noviembre). Medio ambiente: ¿podemos prescindir abruptamente de los combustibles fósiles? *BBC News Mundo*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-59403447>
- [2] Patiño Cantero, I. (2020). *Diseño de un sistema a escala de laboratorio (4 W) de baterías de flujo redox de todo vanadio para investigación* [Tesis de pregrado, Universitat Politècnica de València]. <https://riunet.upv.es/entities/publication/b77f3ec4-9d82-4ba2-ab56-d5feef3d1108>
- [3] Colt, G., Márquez, J., & Márquez, O. (2010). Evaluación de una celda Redox de Vanadio. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 14(56), 183-188. [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1316-48212010000300005&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212010000300005&lng=es&tlng=es)
- [4] Song, Y., Li, X., Yan, C. & Tang, A. (2020). Uncovering ionic conductivity impact towards high power vanadium flow battery design and operation. *Journal of Power Sources*, 480. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229141>
- [5] López Ullauri, C. I., & Poma Tene, J. A. (2023). *Diseño y construcción de un prototipo a escala de laboratorio de una celda electroquímica de flujo redox de vanadio para almacenamiento de energía solar* [Trabajo de titulación, Universidad de Cuenca]. Repositorio Digital Universidad de Cuenca. <https://dspace.uca.edu.ec/items/e2890b35-195a-4570-9e22-f42e7334380d>
- [6] Belmonte, A., & Grespan, S. (2021). *Estudio de membranas para un prototipo de batería de flujo redox de vanadio* [Tesis de pregrado, Universidad Metropolitana]. <https://unimet.ent.sirsi.net/custom/web/tesis/12/TP155B451.pdf>
- [7] Schofield, K. y Musilek, P. (2022). State of charge and capacity tracking in vanadium redox flow battery systems. *Clean Technologies*, 4(3), 607–618. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol4030037>
- [8] Ibáñez, A. (2020). *Diseño hidráulico de una instalación para una batería de flujo redox* [Tesis de pregrado, Universidad de Zaragoza]. <https://zaguan.unizar.es/record/90141/files/TAZ-TFG-2020-006.pdf>
- [9] Al-Yasiri, M. A. (2020). A parametric analysis of the output voltage of all-vanadium redox-flow battery system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 871. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/871/1/012007>
- [10] Ghirlanda, G. (2018). *Development of a vanadium redox flow battery for energy storage* [Tesis de maestría, Instituto Superior Técnico, Lisboa]. [https://scholar.tecnico.ulisboa.pt/api/records/WeQZ9mr2SSC0rhKxYB7whrrU\\_cRr1vD8VIA/file/5ab31244359219030184d40e7175048d6ed0935c35f749a5dc4186a892275294.pdf](https://scholar.tecnico.ulisboa.pt/api/records/WeQZ9mr2SSC0rhKxYB7whrrU_cRr1vD8VIA/file/5ab31244359219030184d40e7175048d6ed0935c35f749a5dc4186a892275294.pdf)
- [11] Perdomo, M. (2021). *Análisis comparativo de los sistemas de baterías de flujo redox para su aplicación en el almacenamiento de energías renovables* [Tesis de pregrado, Universidad Metropolitana]. <https://unimet.ent.sirsi.net/custom/web/tesis/12/ATTP155P433.pdf>
- [12] Rodríguez, R. M., Conforti, N., Pérez, M. & Sanoja, G. (2023). Evaluación de componentes internos de una BFRV conducente al diseño de un prototipo teórico. *Producción + Limpia*, 18(2). <https://doi.org/10.22507/PML.V18N2A8>
- [13] Berkowitz, A., Caiado, A. A., Aravamuthan, S. R., Roy, A., Agar, E. & Inalpolat, M. (2024). Optimization framework for redox flow battery electrodes with improved microstructural characteristics. *Energy Advances*, 3(9). <https://doi.org/10.1039/D4YA00248B>
- [14] Han, L., Chen, H., Cheng, X., He, Q., Chen, F. & Zhang, Q. (2023). Numerical analysis and optimization of flow rate for vanadium flow battery incorporating temperature effect. *Batteries*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/batteries9060312>
- [15] Charvát, J., Mazúr, P., Dundálek, J., Pociedič, J., Vrána, J., Mrlik, J., Kosek, J. & Dinter, S. (2020). Performance enhancement of vanadium redox flow battery by optimized electrode compression and operational conditions. *Journal of Energy Storage*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101468>
- [16] Walsh, F. C., Cruden, A., & Hall, P. J. (2022). An introduction to electrochemistry in modern power sources. En A. Hauer (Ed.), *Advances in energy storage: Latest developments from R&D to the market* (Cap. 2). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119239390.ch2>
- [17] Schofield, K., & Musilek, P. (2022). State of charge and capacity tracking in vanadium redox flow battery systems. *Clean Technologies*, 4(3). <https://doi.org/10.3390/cleantechnol4030037>



- [18] Loktionov, P., Pichugov, R., Konev, D., Petrov, M., Pustovalova, A. & Antipov, A. (2022). Operando UV/Vis spectra deconvolution for comprehensive electrolytes analysis of vanadium redox flow battery. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 925. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116912>
- [19] Shu, B., Weber, L. S., Skyllas-Kazacos, M., Bao, J., & Meng, K. (2023). Thermal modelling and simulation studies of containerised vanadium flow battery systems. *Batteries*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/batteries9040196>
- [20] Kim, S. (2019). Vanadium redox flow batteries: Electrochemical engineering. In M. Taha & A. Attia (Eds.), *Energy storage devices* (pp. 115–133). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.85166>
- [21] Sun, J., Zheng, M., Yang, Z. & Yu, Z. (2019). Flow field design pathways from lab-scale toward large-scale flow batteries. *Energy*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.107>
- [22] Gundlapalli, R. & Jayanti, S. (2020). Performance characteristics of several variants of interdigitated flow fields for flow battery applications. *Journal of Power Sources*, 467. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228225>
- [23] Yang, P., Dong, S., Tang, J., Li, Y., Xiong, B., & Beng, G. H. (2022). A multi-physics model of vanadium redox flow battery for grid control. En *2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PESGM48719.2022.9916965>
- [24] Zhong, L. y Chu, F. (2023). A novel biomimetic lung-shaped flow field for all-vanadium redox flow battery. *Sustainability*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/su151813613>
- [25] Alcalde Bru, A. (2019). *Modelling of an energy storage system using redox flow batteries* [Trabajo de pregrado, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona]. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/167411/tfg-albert-alcalde.pdf>
- [26] Guan, X., Skyllas-Kazacos, M. & Menictas, C. (2023). A three-dimensional hydraulic stack model for redox flow batteries considering porosity variations in porous felt electrodes and bypass flow in side gaps. *Batteries*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/batteries9070359>
- [27] Clemente, A., Montiel, M., Barreras, F., Lozano, A. & Costa-Castelló, R. (2021). Vanadium redox flow battery state of charge estimation using a concentration model and a sliding mode observer. *IEEE Access*, 9. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3079382>
- [28] Wang, J., Mu, A., Yang, B., Wang, Y. & Wang, W. (2024). Numerical simulation of all-vanadium redox flow battery performance optimization based on flow channel cross-sectional shape design. *Journal of Energy Storage*, 93. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112409>
- [29] Puleston, T., Clemente, A., Costa-Castelló, R. & Serra, M. (2022). Modelling and estimation of vanadium redox flow batteries: A review. *Batteries*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/batteries8090121>
- [30] Chemours. (2022). *Nafion®: Materiales de intercambio iónico*. <https://www.chemours.com/es/-/media/files/nafion/nafion-ion-exchange-membranes-brochure.pdf?la=es&rev=808f1636e2f0446a9b85e595b53cca2e>
- [31] Lourenssen, K., Williams, J., Ahmadpour, F., Clemmer, R. & Tasnim, S. (2019). Vanadium redox flow batteries: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100844>
- [32] Huang, Z., Mu, A., Wu, L., Yang, B., Qian, Y. y Wang, J. (2022). Comprehensive analysis of critical issues in all-vanadium redox flow battery. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(24). <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c01372>
- [33] Zhao, Y., Liu, L., Qiu, X. y Xi, J. (2019). Revealing sulfuric acid concentration impact on comprehensive performance of vanadium electrolytes and flow batteries. *Electrochimica Acta*, 303. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.02.062>
- [34] Berkowitz, A., Caiado, A. A., Aravamuthan, S. R., Roy, A., Agar, E. y Inalpolat, M. (2024). Optimization framework for redox flow battery electrodes with improved microstructural characteristics. *Energy Advances*, 3. <https://doi.org/10.1039/D4YA00248B>
- [35] Charvát, J., Mazúr, P., Dundálek, J., Pociedič, J., Vrána, J., Mrlík, J., Kosek, J., & Dinter, S. (2020). Performance enhancement of vanadium redox flow battery by optimized electrode compression and operational conditions. *Journal of Energy Storage*, 30, 101468. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101468>
- [36] Romanovskaia, E., Romanovski, V., Kwapinski, W. & Kurilo, I. (2021). Selective recovery of vanadium pentoxide from spent catalysts of sulfuric acid production: Sustainable approach. *Hydrometallurgy*, 200. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105568>



- [37] Olabi, A. G., Allam, M. A., Abdelkareem, M. A., Deepa, T. D., Alami, A. H., Abbas, Q., Alkhalidi, A. & Sayed, E. T. (2023). Redox flow batteries: Recent development in main components, emerging technologies, diagnostic techniques, large-scale applications, and challenges and barriers. *Batteries*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/batteries9080409>
- [38] Becker, M. y Turek, T. (2020). Combination of impedance spectroscopy and potential probe sensing to characterize vanadium redox-flow batteries. *Journal of Power Sources*, 446. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227349>
- [39] Chemours. (2024). *Teflon® PTFE: Fluoropolymers resins at a glance*. <https://www.teflon.com/en/-/media/files/teflon/teflon-ptfe-resins-product-info.pdf?rev=71163f565b8f40988b77805cc1abe405>
- [40] Chemours. (2024). *Viton® PTFE: Solutions for extreme conditions*. Lagon Rubber. [https://www.lagonrubber.com/wp-content/uploads/2024/05/Catalogo-LAGON-Viton\\_2024.pdf](https://www.lagonrubber.com/wp-content/uploads/2024/05/Catalogo-LAGON-Viton_2024.pdf)
- [41] Al-Yasiri, M., & Park, J. (2018). A novel cell design of vanadium redox flow batteries for enhancing energy and power performance. *Applied Energy*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.025>
- [42] POLYVANTIS . (2024). *PLEXIGLAS® and EUROPLEX® films: Always on top*. <https://www.plexiglas.de/files/plexiglas-content/pdf/broschuere/119-1-PLEXIGLAS-and-EUROPLEX-Films.pdf>
- [43] Atlas Scientific. (2024). *EZO-PMP™ embedded dosing pump*. V 3.0. Revised 3/24. [https://files.atlas-scientific.com/EZO\\_PMP\\_Datasheet.pdf](https://files.atlas-scientific.com/EZO_PMP_Datasheet.pdf)
- [44] Atlas Scientific. (2022). *Conductivity Gen 2 probe K 10 platinum*. (v. 4.1). [https://files.atlas-scientific.com/EC\\_K\\_10\\_probe.pdf](https://files.atlas-scientific.com/EC_K_10_probe.pdf)
- [45] Atlas Scientific. (2024). *EZO-EC™ Embedded Conductivity Circuit*. (v. 6.5). [https://files.atlas-scientific.com/EC\\_EZO\\_Datasheet.pdf](https://files.atlas-scientific.com/EC_EZO_Datasheet.pdf)
- [46] Allegro Microsystems. (2024). *ACS712: Fully integrated, Hall-effect-based linear current sensor IC with 2.1 kV RMS voltage isolation and a low-resistance current conductor*. <https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs712-datasheet.pdf>
- [47] Arduino. (2025). *Arduino® UNO R3: User manual SKU: A000066*. <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>
- [48] Texas Instruments. (2015). *LMx35, LMx35A precision temperature (Rev. E)*. [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm235.pdf?ts=1743337889493&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM235](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm235.pdf?ts=1743337889493&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM235)
- [49] Shenzhen XingKeChuang Technology Co., Ltd. (2020). *XKC-Y25-V liquid level sensor: Manual (v. 1.6)*. <https://www.xkc-sensor.com/upload/1686717723.pdf>
- [50] American National Standards Institute. (2024). *ANSI/ASME B31.3: Process piping* (Norma técnica No. 9780791876725).
- [51] Kumar, S. y Jayanti, S. (2016). Effect of flow field on the performance of an all-vanadium redox flow battery. *Journal of Power Sources*, 307. 782-787. [doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016-01-048](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016-01-048)
- [52] Sun, C., Delnick, F., Aaron, D., Papandrew, A., Mench, M. y Zawodzinski, T. (2013). Probing Electrode Losses in All-Vanadium Redox Flow Batteries with Impedance Spectroscopy. *ECS Electrochemistry Letters*, 2(5), A43-A45. [doi.org/10.1149-2001305eel](https://doi.org/10.1149-2001305eel)
- [53] Al-Fetlawi, H. A.-Z. A.-Y. (2010). Modelling and simulation of all-vanadium redox flow batteries (Tesis doctoral, University of Southampton, Faculty of Engineering and the Environment, School of Engineering Sciences). <https://eprints.soton.ac.uk/181523/1/Phd.pdf>
- [54] Lee, H., Choi, N. y Kim, H. (2014). Analysis of Concentration Polarization Using UV-Visible Spectrophotometry in a Vanadium Redox Flow Battery. *Journal of the Electrochemical Society*, 161(9), A1291-A1296. [doi.org/10.1149-20631409jes](https://doi.org/10.1149-20631409jes)
- [55] Hung, Y., Bu, Y., Kubin, J., & Weinman, D. (2017). Effects of current scan rate on the polarization curve of vanadium redox flow batteries. En *2017 International Energy and Sustainability Conference (IESC)* (pp. 1-4). Farmingdale, NY, USA. <https://doi.org/10.1109/IESC.2017.8167489>
- [56] Zheng, Q., Zhang, H., Xing, F., Ma, X., Li, X. y Ning, G. (2014). A three-dimensional model for thermal analysis in a vanadium flow battery. *Applied Energy*, 113, 1675-1685. [doi.org/10.1016/j.apenergy.2013-09-021](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013-09-021)



- [57] Aaron, D., Liu, Q., Tang, Z., Grim, G., Papandrew, A., Turhan, A. y Zawodzinski, T. (2012). Dramatic performance gains in vanadium redox flow batteries through modified cell architecture. *Journal of Power Sources*, 206, 450-453. doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011-12-026
- [58] Roy, A. (2018). Development Of An All Vanadium Redox Flow Battery For Efficient Utilization Of Renewable Energy [Tesis de Maestría, Indian Institute of Engineering Science and Technology]. doi.org/10.13140/RG-2223646-95047
- [59] Sankaralingam, R. K., Seshadri, S., Sunarso, J., Bhatt, A. I., & Kapoor, A. (2021). Overview of the factors affecting the performance of vanadium redox flow batteries. *Journal of Energy Storage*. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102857>
- [60] Tian, W., Du, H., Wang, J., Weigand, J. J., Qi, J., Wang, S., & Li, L. (2023). A review of electrolyte additives in vanadium redox flow batteries. *Materials*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/ma16134582>
- [61] Gundlapalli, R., & Jayanti, S. (2021). Case studies of operational failures of vanadium redox flow battery stacks, diagnoses and remedial actions. *Journal of Energy Storage*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102078>
- [62] Ashok, A., & Kumar, A. (2024). A comprehensive review of metal-based redox flow batteries: progress and perspectives. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 17(1). <https://doi.org/10.1080/17518253.2024.2302834>

## Empirical evaluation of parallel implementations of MergeSort

José E. Solsona<sup>1\*</sup>, Sergio Nesmachnow<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad ORT, Montevideo, Uruguay.

<sup>2</sup>Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

\*Corresponding author, email: [solsona@ort.edu.uy](mailto:solsona@ort.edu.uy)

## Evaluación empírica de implementaciones paralelas de MergeSort

### Abstract

Sorting algorithms are a fundamental piece in the development of computer systems. MergeSort is a well-known sorting algorithm, much appreciated due to its efficiency, relative simplicity, and other features. This article presents an empirical evaluation of parallel versions of MergeSort, applying shared and distributed memory, on a high-performance computing infrastructure. The main result indicates that parallelization of recursive invocations combined with a parallel merge operation offers better speedup than just parallelization of recursive invocations. Moreover, better speedup was achieved in a shared memory environment.

**Keywords:** High Performance Computing, Parallel sorting

### Resumen

Los algoritmos de ordenamiento son una pieza fundamental en el desarrollo de sistemas informáticos. MergeSort es un algoritmo de ordenamiento muy conocido, muy apreciado por su eficiencia, relativa simplicidad y otras características. Este artículo presenta una evaluación empírica de versiones paralelas de MergeSort, aplicando memoria compartida y distribuida, en una infraestructura computacional de alto rendimiento. El resultado principal indica que la paralelización de invocaciones recursivas combinada con una operación de mezcla paralela ofrece una mejor aceleración que la paralelización de invocaciones recursivas por sí sola. Además, se logró una mejor aceleración en un entorno de memoria compartida.

**Palabras clave:** Computación de alto rendimiento, Ordenamiento paralelo

### INTRODUCTION

Sorting algorithms are a fundamental piece in the development of computer systems and information processing. In particular, MergeSort is a general-purpose sorting algorithm based on element comparison [1]. Although it is reasonable to assume that the basic sorting operation of performing a comparison has low computational cost, sorting large volumes of data in the Big Data era would require long execution times using sequential



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Dennis Cazar

Recibido /  
Received:  
20/11/2024

Aceptado /  
Accepted:  
09/12/2024

Publicado en línea /  
Published online:  
08/05/2025



sorting implementations. Therefore, it is natural to explore adapting existing algorithms to leverage the parallel processing capabilities provided by modern hardware.

In this line of work, this article presents an empirical evaluation of parallel versions of the MergeSort algorithm in high-performance computing environments. The developed parallel versions of MergeSort are based on shared and distributed memory, following different parallelization schemes, using the OpenMP interface and the Message Passing Interface (MPI) library. The evaluation was carried out on a problem instance of size elements, considering up to 39 computing resources.

The main results of the empirical evaluation indicate that in the shared memory implementation parallelization of recursive invocations combined with a parallel merge operation offers better speedup than just parallelization of recursive invocations, as suggested by theoretical analysis. For the distributed memory implementation, a functional decomposition approach performed better than a straightforward master-slave approach. However, the functional decomposition approach did not result in better performance results than a hybrid implementation combining distributed and shared memory. Overall, the best speedup was achieved in the shared memory implementations.

## PROBLEM DESCRIPTION

### Classical MergeSort

MergeSort is a general-purpose sorting algorithm based on element comparison and the divide-and-conquer strategy [2]. On a conceptual level, MergeSort operates as follows on a vector of  $n$  elements:

1. Divide the vector into  $n$  parts, each with a single element, which are considered ordered.
2. Merge the parts producing new ordered vectors until only one ordered vector remains as the final result.

MergeSort is presented in Algorithm 1. Sequential MergeSort., following the version by Cormen et al. [3]. Being an algorithm based on the divide-and-conquer strategy, its most natural description is recursive. Assuming an initial vector  $A=(a_1, \dots, a_n)$ , the result is obtained by invoking *MergeSort* ( $A, l, A.len$ ), where  $A.len = n$ ,  $l$  (*left*) stands for the initial position, and  $r$  (*right*) stands for the final position.

---

```

procedure MERGESORT( $A, l, r$ )
  if  $l < r$  then
     $m := \lfloor (l + r) / 2 \rfloor$ 
    MERGESORT( $A, l, m$ )
    MERGESORT( $A, m + 1, r$ )
    MERGE( $A, l, m, r$ )

```

▷ Sort first half  
 ▷ Sort second half  
 ▷ Merge both halves

---

**Algorithm 1.** Sequential MergeSort.



The division of the problem is performed by two recursive invocations of the procedure MergeSort on the left part  $A[1, \dots, m]$  and the right part  $A[m+1, \dots, r]$  of the vector, respectively. The division is performed while there are at least two elements, since otherwise the vector is already sorted. After the division, the conquer action is carried out through the Merge operation to merge the parts  $A[1, \dots, m]$  and  $A[m+1, \dots, r]$  already ordered. The usual way to implement this operation follows the intuitive idea of how to mix two decks of cards already sorted where the smallest cards appear on top. The basic step consists of comparing two cards taken from each deck where we choose and remove the smallest one to build a new deck. We repeat the step until one of the decks runs out of cards in which case the remaining cards will go to the end of the new deck. The sequential merge operation is presented in Algorithm 2. Sequential merge operation.. The presented version differs slightly from the one by Cormen et al. [3] since it does not use sentinels, just to simplify the presentation.

---

```

procedure MERGE( $A, l, m, r$ )
   $i, j, k := l, m + 1, 1$ 
  Let  $T$  be a new vector of size  $r - l + 1$ .
  while  $i \leq m \wedge j \leq r$  do                                ▷ Both halves not empty
    if  $A[i] \leq A[j]$  then
       $T[k] := A[i]$ 
       $i := i + 1$ 
    else
       $T[k] := A[j]$ 
       $j := j + 1$ 
     $k := k + 1$ 
  while  $i \leq m$  do                                          ▷ Remaining elements on the left
     $T[k] := A[i]$ 
     $i, k := i + 1, k + 1$ 
  while  $j \leq r$  do                                          ▷ Remaining elements on the right
     $T[k] := A[j]$ 
     $j, k := j + 1, k + 1$ 
  for  $k \in [1..T.len]$  do
     $A[l + k] := T[k]$ 

```

---

### Algorithm 2. Sequential merge operation.

The computational complexity of MergeSort considers the number of comparisons performed when shuffling as the representative operation of the execution time cost. In general, mixing in MergeSort requires no more than  $n-1$  comparisons for a vector of elements. The total cost is the sum of the cost of ordering two halves plus the cost of merging them. Therefore, in the worst case (and also in the average case) the cost of MergeSort is  $T(n) = 2T(n/2) + \Theta(n) = \Theta(n \log n)$ .

Regarding memory cost, the typical implementation of MergeSort is not considered an in-place algorithm since the merge operation requires space  $\Theta(n)$  for an auxiliary vector (vector  $T$  in Algorithm 2. Sequential merge operation.).

Since the cost of MergeSort coincides with the lower bound, MergeSort is said to be optimal. There are other optimal sorting algorithms (e.g., HeapSort), but



implementations of MergeSort have the property of stability, as equal elements maintain their position. This property, together with its relative simplicity, makes MergeSort attractive for several applications.

## RELATED WORK

Several parallel implementations have been proposed for MergeSort. Rolfe [4] proposed an approach for implementing a parallel MergeSort in a distributed memory environment using MPI. The proposed algorithm did not consider a strategy for parallelization of the mixing operation. The experimental performance evaluation was not systematic. Few executions were reported, showing that a better speedup is obtained when the processes are executed within the same machine. This finding emphasizes the importance of considering communication overhead when assessing the performance of parallel implementations. Radensky [5] presented MergeSort implementations using OpenMP and MPI. However, the parallelization of the merge operation was not considered. The experimental evaluation showed that better performance was computed by the shared-memory implementation using OpenMP. Duvanenko [6] implemented a parallel MergeSort using the Microsoft PPL and Intel TBB libraries. Performance gains were reported for problem instances larger than  $10^5$  on a quad core machine. Axtmann et al. [7] studied how to scale MergeSort generalizations efficiently across a significant number of resources. The research aimed at addressing the challenges associated with handling large-scale applications by optimizing the communication aspects of the sorting algorithms.

The analysis of related works indicates that there is a better understanding of the sorting problem in theory than in practice. In this article, the distributed memory implementations follow a similar approach to Radensky [5], while the hybrid implementation incorporates parallel merging at the shared-memory level.

## Parallelization of MergeSort

This section describes strategies for the developed parallel MergeSort versions.

### Overall parallel approaches

MergeSort follows a divide-and-conquer strategy, and the natural technique for parallelization is domain decomposition. All parallel versions of MergeSort follow the strategy of executing in parallel on different partitions of the input vector.

Specific instructions are applied for creating threads (**fork**) or processes (**spawn**), assuming a dynamic multithreading environment following the style presented by Cormen et al. [3]. Communications and synchronizations are performed using **sync** and **join** instructions in the shared memory implementations, or via explicit message passing (**Send** and **Receive**) in the distributed memory implementations.

The intuitive semantics of **spawn**  $f(x_1, \dots, x_n)$  indicate that the execution of  $f(x_1, \dots, x_n)$  can take place in a new thread of execution, and there is no need to wait for its completion



to proceed. Similarly, the intuitive semantics of **sync** instructs the current thread of execution to wait until all previously created threads have finished their execution. Some parallel programming platforms offer similar instructions to express nested parallelism, but the implementations use them as a means to convey the expected solution at an abstract level.

From a theoretical perspective, there is a lower bound for the comparison ordering problem in the parallel paradigm. Considering  $n$  processing units to sort  $n$  elements, no algorithm using the available  $n$  processors can achieve a sorting time less than a constant multiple of  $n$  comparisons in the worst case.

### First version: Parallelizing recursive invocations

The first parallel version of MergeSort (MergeSortPv1) is based on parallelizing only recursive invocations. This version uses the sequential merge algorithm described in Algorithm 2. Sequential merge operation.. Algorithm 3. Parallel MergeSort (parallel recursive invocations). presents the pseudocode of MergeSortPv1.

---

```

procedure MERGESORTPV1( $A, l, r$ )
  if  $l < r$  then
     $m := \lfloor (l + r)/2 \rfloor$ 
    spawn MERGESORTPV1( $A, l, m$ )
    spawn MERGESORTPV1( $A, m + 1, r$ )
  sync
  MERGE( $A, l, m, r$ )

```

---

**Algorithm 3.** Parallel MergeSort (parallel recursive invocations).

The execution cost of MergeSortPv1 on a single processor matches the execution cost of MergeSort. Ideally, for an unlimited number of processing units, recursive invocations can execute in parallel, but the merge operation imposes a linear cost. The ideal parallelizability of this approach is given by Eq. i (1), where  $TP_i$  is the execution time on a parallel machine with  $i$  processing units.

$$\frac{TP_1}{TP_\infty} = \frac{\Theta(n \log n)}{\Theta(n)} = \Theta(\log n) \quad (1)$$

### Second version: Parallelizing the merge operation

The second version of parallel MergeSort (MergeSortPv2) is based on parallelizing the merge operation to improve the degree of parallelism of the first version of parallel MergeSort. In the previous version, the merge operation is the main limitation for parallelization, since it is inherently sequential. Thus, a new merging algorithm is used (MergeP, presented in Algorithm 4. Parallel merge operation.), which also applies the divide-and-conquer strategy and is, therefore, also naturally parallelizable.



At a conceptual level, MergeP operates on two ordered vectors  $A$  and  $B$  (where  $A.len \geq B.len$  is assumed, without loss of generality) as follows:

1. Divide  $A$  into two parts  $A_1$  and  $A_2$ .
2. Let  $x$  be the first element of  $A_2$ . A binary search is performed on  $B$  to find the position  $h$  where  $x$  should be inserted into  $B$ . Then  $B$  is partitioned over  $h$ , generating two parts  $B_1$  and  $B_2$ .
3.  $A_1$  is merged with  $B_1$  resulting in the first sorted half, and  $A_2$  is merged with  $B_2$  resulting in the second sorted half.

---

```

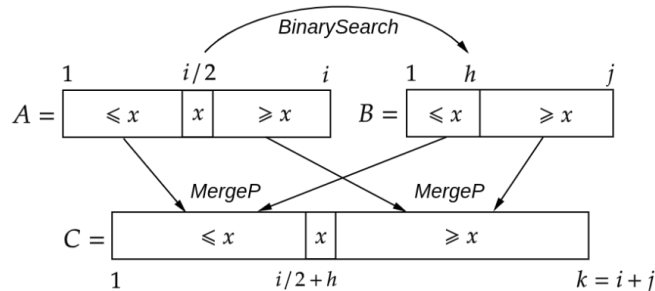
procedure MERGEP( $A[1..i], B[1..j], C[1..k]$ )
    if  $j > i$  then
        MERGEP( $B[1..j], A[1..i], C[1..k]$ )
        return
    if  $k = 1$  then
         $C[1] := A[1]$ 
        return
    if  $i = 1$  then
        if  $A[1] \leq B[1]$  then
             $C[1] := A[1]$ 
        else
             $C[1] := B[1]$ 
        return
    Search  $h$  such that  $B[h] \leq A[i/2] \leq B[h + 1]$ .
    spawn MERGEP( $A[1..(i/2)], B[1..h], C[1..(i/2 + h)]$ )
    spawn MERGEP( $A[(i/2 + 1)..i], B[(h + 1)..j], C[(i/2 + h + 1)..k]$ )
    sync
    return  $C$ 
    
```

▷ Ensure  $A.len \geq B.len$

---

**Algorithm 4.** Parallel merge operation.

Figure 1. Description of the logic in MergeP. shows an intuitive scheme of how the result  $C$  is constructed from the input vectors  $A$  and  $B$  in Algorithm 4. Parallel merge operation..



**Figure 1.** Description of the logic in MergeP.



The cost of executing MergeP on a single processor is asymptotically equal to the sequential version. However, assuming an unlimited number of process units, the cost is logarithmic rather than linear, i.e.,  $\Theta(\log^2 n)$ , assuming that the search for position is performed in a binary way.

Thus, in the parallel version of MergeSort using MergeP instead of Merge, the cost on a single processor matches the cost of MergeSortPv1, but on an ideal machine the cost is  $\Theta(\log^3 n)$ . The ideal parallelizability of this approach is given by Eq. In comparison, the theory suggests that the second proposed version has the property of scaling better over additional computing resources, ignoring any overhead associated with parallelism..

$$\frac{TP_1}{TP_\infty} = \frac{\Theta(n \log n)}{\Theta(\log^3 n)} = \Theta\left(\frac{n}{\log^2 n}\right) \quad (2)$$

In comparison, the theory suggests that the second proposed version has the property of scaling better over additional computing resources, ignoring any overhead associated with parallelism.

## Implementation details

This section describes the implementation details of the developed sequential and parallel versions of MergeSort. The code is publicly available on GitHub, <https://github.com/josedusol/parallel-merge-sort>.

### Sequential implementation

MergeSort.c is the classic implementation of MergeSort in the C language, following Algorithm 1. Sequential MergeSort.. The best implementations of MergeSort typically apply another stable sorting algorithm (e.g. InsertionSort) for small inputs, taking advantage of improved efficiency on those inputs. This hybrid approach is not applied in the developed implementation, to guarantee a fair comparison with the developed parallel implementations of MergeSort.

### Shared memory implementations

The shared memory implementations of MergeSort were developed using the C language and the OpenMP application programming interface (API). Two approaches provided by the OpenMP API were studied for the execution of code segments in parallel:

1. **sections** directive. Each recursive invocation is placed in a different section. Because there is an implicit synchronization barrier at the end of this directive, the merge operation is inserted after. This alternative is only applicable if the nested parallelism option **OMP\_NESTED** is explicitly activated.
2. **task** directive, available from OpenMP v3.0 onward. This is the best alternative to support unstructured parallelism, such as the one arising from parallel recursion. In this case, each recursive invocation is a different task. For the merge operation,



it is necessary to also use `taskwait` which explicitly indicates the precedence between the split and merge tasks.

Preliminary experiments showed that `task/taskwait` allowed for computing better performance results. Thus, this approach was adopted for deployments.

`MergeSortPv1_omp.c` implements the MergeSortPv1 algorithm. The merge operation in the algorithm assumes that a new temporal vector is used for each invocation. However, a more efficient approach is to create a single vector before starting the sort and pass its address as a parameter to the involved routines. By doing so, the overhead associated with the initializing and releasing memory in each invocation is avoided. The overhead reduction implies that the same vector is used concurrently by different threads, accessing different portions during the merge process, without any risk of data races.

`MergeSortPv2_omp.c` implements the MergeSortPv2 algorithm, following the version presented by Cormen et al. [3]. The algorithm receives the original array  $A$  and an additional output array  $B$  to store the resulting values. However, it assumes that a new temporal vector  $T$  is used in each invocation. This vector is passed as the extra output array to the recursive calls, and the parallel merge operation is performed on  $T$ , storing the result in  $B$ . This approach has overhead due to initializing and releasing memory in each invocation, similar to the merge phase in the previous algorithm MergeSortPv1. To avoid this overhead and eliminate the need for additional vectors, a solution is to swap the roles of vectors  $A$  and  $B$  at each level of the recursion. In fact, without this optimization, the speedup achieved by this implementation is only marginally higher than that of the `MergeSortPv1_omp.c` implementation.

In both implementations, creating OpenMP tasks at each level of the recursion introduces an overhead that degrades the expected performance gains, even though creating a task does not mean creating a new operating system thread. To mitigate this negative factor, one approach is to limit the application of parallelism based on either the size of the input vector or the depth of the recursion. The developed implementations apply the restriction based on the size of the input vector.

On the one hand, in the implementation of `MergeSortPv1_omp.c`, MergeSort is invoked sequentially for sizes smaller than a threshold value `CUT_OFF`. On the other hand, there are two different levels of recursion to control in `MergeSortPv2_omp.c`: initially, MergeSort is executed sequentially for sizes less than a threshold value `CUT_OFF_1`, and the sequential Merge is called for the total sizes (i.e., the sum of the sizes of two vectors) less than a threshold value `CUT_OFF_2`.

The optimal values for thresholds `CUT_OFF`, `CUT_OFF_1`, and `CUT_OFF_2` are platform-dependent and are determined through empirical testing and experimentation. These values are chosen in an ad-hoc manner to achieve the best performance on the specific computing platform.

## Distributed memory implementations

The distributed memory implementations of MergeSort were developed using the C language and the MPI library. Three implementations were developed, applying a

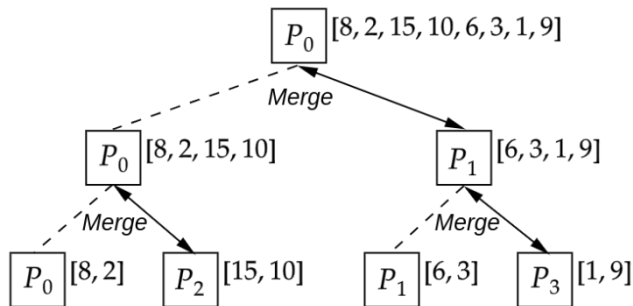


straightforward master-slave approach, a functional decomposition approach, and a hybrid approach combining distributed and shared memory for efficient computation. The developed implementations are described next.

`MergeSortPv0_mpi.c` is a distributed memory implementation of MergeSort based on worksharing. A master-slave hierarchical architecture is applied. The master evenly divides the input vector and distributes chunks using `MPI_Scatter` among the available processes so that each process performs a local sequential sorting in the assigned chunk. The processes return the sorted parts to the master process using `MPI_Gather`, and the master performs a final sequential sort. Although this implementation does not correspond exactly to the theoretical algorithms MergeSortPv1 and MergeSortPv2, it is the most direct and elementary parallelization of the problem using MPI, and therefore it is interesting to consider it for simplicity as a baseline for the comparison of efficiency results.

`MergeSortPv1_mpi.c` is an implementation of the MergeSortPv1 algorithm, applying a functional decomposition technique [5].

A virtual tree of processes that represents the tree of recursive calls is built. At each level, different processes work in parallel either to divide or to merge. The depth of the process tree is limited by the number of available processes. The base case in the construction of the tree is to invoke MergeSort sequentially for the leaf nodes of the tree. Figure 2. Virtual tree of four processes to sort vector. presents a scheme of the functional decomposition technique when using four processes on a vector of eight elements. The dashed lines indicate that the process retains the first half of the vector, and the bi-directional arrows indicate that the process should send the second half of the vector to an auxiliary process. The four lists of size 2 on the leaves of the tree are ordered sequentially. Asynchronous communications are performed, using `MPI_Isend`, to properly overlap data transmission and computation. Then, the process receives the ordered half from the auxiliary process using a standard `MPI_Recv` routine.



**Figure 2.** Virtual tree of four processes to sort vector .

`MergeSortPv2_hyb.c` is a hybrid implementation of the MergeSortPv2 algorithm using MPI and OpenMP. The data splitting phase is implemented using MPI, as performed in `MergeSortPv1_mpi.c`, and the merge operation is implemented using OpenMP, as



performed in `MergeSortPv2_omp.c`. Additionally, OpenMP is also used in the base case of the virtual process tree. Parallelism restrictions with the values `CUT_OFF_1` and `CUT_OFF_2` are also applied to mitigate the overhead associated with threads creation and management in OpenMP.

## Experimental evaluation

This section describes the empirical analysis of the developed parallel MergeSort implementations.

## METHODOLOGY

The experimental evaluation was performed over a large vector of size with random integers. The memory required to store the vector was roughly 3 GB. Every experiment was repeated five times to avoid fluctuating execution times. If applicable, outliers were detected and discarded. The overall execution time was the average of non-discarded execution times.

**Evaluation of shared memory implementations.** For shared memory implementations, the main configurable parameter is the number of threads to use, set by the environment variable `OMP_NUM_THREADS`. The experiments studied the performance using a number of threads in the range of 1 to 39. The number of threads is always matched to the number of CPU cores available. The execution time (walltime) is measured using the `omp_get_wtime` function.

**Evaluation of distributed memory implementations.** The distributed memory implementations are executed through `mpiexec/mpirun`. The main configurable parameter is `np`, indicating the number of processes for execution. The experiments studied the performance using a number of processes in the range of 1 to 16. In particular, for the `MergeSortPv0_imp.c` implementation, only those numbers of processes that divide the size of the vector were used (1, 2, 4, 5, 8, 10, and 16). On the other hand, for the hybrid implementation `MergeSortPv2_hyb.c`, four CPU cores are always requested per process, and OpenMP is configured to use four threads. Additionally, the hybrid implementation was executed in a distributed manner in two different nodes. The walltime is measured using the `MPI_wtime` function. To make this measurement meaningful, a barrier (`MPI_Barrier`) was included before and after performing the sort, taking the initial time after the first barrier and the final time after the second barrier.

## Performance evaluation metrics

The execution time is used as the main metric for performance evaluation. The performance evaluation of parallelism is focused on strong scalability, i.e., how the execution time varies when using a different number of processing units for a fixed input size. The goal is to reduce the execution time.

The traditional approach applying the algorithmic speedup is applied to evaluate performance. Speedup computes the ratio of the execution time of a baseline sequential



implementation  $T_S$  and the execution time of the parallel algorithm using  $N$  compute resources  $TP_N$  (Eq. (3)) In this case, the sequential algorithm is **MergeSort.c**, described before. Computational efficiency is the normalized version of the speedup (Eq. Development and execution platform).

$$S_N = \frac{T_S}{TP_N} \quad (3)$$

$$E_N = \frac{S_N}{N} \quad (4)$$

## Development and execution platform

The proposed algorithms were developed in the C language, using the GCC v8 compiler. Initial local developments were performed using the MPICH v3.2 implementation of MPI, and the final development was performed using the OpenMPI implementation of MPI.

The experimental evaluation was performed on the high-performance computing infrastructure of National Supercomputing Center, Uruguay (ClusterUY) [8]. Each computing node has two Intel Xeon Gold 6138 CPUs with 20 cores each and 128 GB of RAM. Nodes are connected by 10 Gbps Ethernet. Executions were performed without using hyperthreading.

## Efficiency results

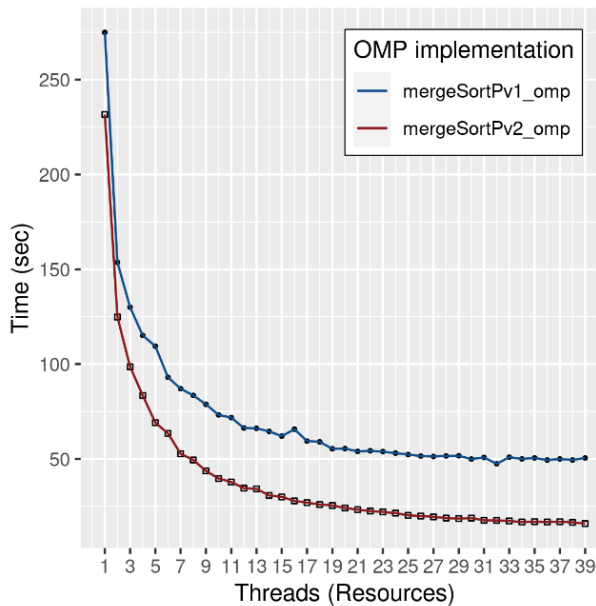
This subsection reports on the efficiency results of the developed parallel versions of MergeSort. For OpenMP-based implementations, the following values were determined in preliminary experiments to mitigate overheads:  $CUT\_OFF = 800$  in **MergeSortPv1\_omp.c** and the hybrid implementation **MergeSortPv2\_hyb.c**, and  $CUT\_OFF\_1=800$ ,  $CUT\_OFF\_2=80000$  in **MergeSortPv2\_omp.c** and the hybrid implementation **MergeSortPv2\_hyb.c**.

**Shared-memory implementations.** Table 1 reports the average execution times of the shared memory implementations using OpenMP. For reference, the average execution time of the sequential implementation **MergeSort.c** for  $n=10^9$  w was 318.67s. Figure 3 graphically presents the evolution of execution times.



**Table 1.** Execution time (s) for different numbers of computing resources (threads) for shared memory MergeSort implementations using OpenMP.

implementation	computing resources					
	1	2	4	8	16	32
MergeSortPv1_omp	274.96	153.68	115.14	83.49	65.66	47.42
MergeSortPv2_omp	231.69	124.86	83.48	49.43	27.85	17.59



**Figure 3.** Execution time of shared memory OpenMP MergeSort implementations.

Tables 2 and 3 report the speedup and efficiency values computed for the shared memory implementations using OpenMP. Figure 4 graphically presents the graphs of speedup and efficiency as a function of the number of threads.

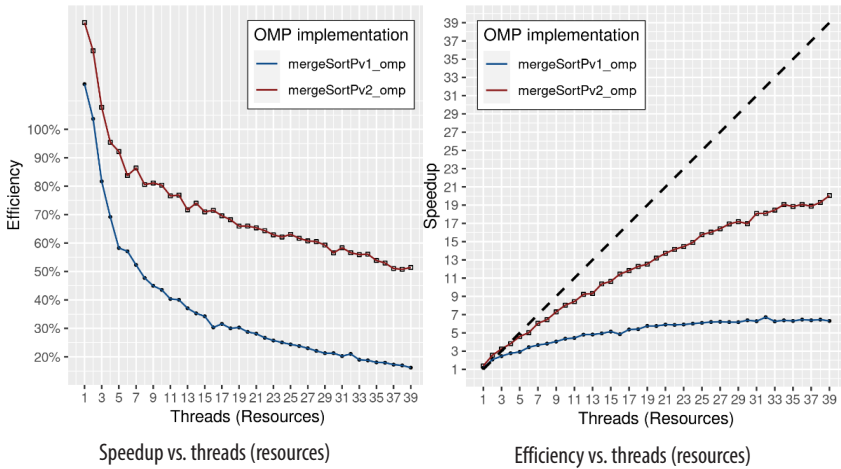
**Table 2.** Speedup for different number of computing resources (threads) for shared memory MergeSort implementations using OpenMP.

implementation	speedup					
	$S_1$	$S_2$	$S_4$	$S_8$	$S_{16}$	$S_{32}$
MergeSortPv1_omp	1.16	2.07	2.77	3.82	4.85	6.72
MergeSortPv2_omp	1.38	2.55	3.82	6.45	11.44	18.11



**Table 3.** Efficiency for different number of computing resources (threads) for shared memory MergeSort implementations using OpenMP.

implementation	efficiency					
	$E_1$	$E_2$	$E_4$	$E_8$	$E_{16}$	$E_{32}$
MergeSortPv1_omp	1.16	1.04	0.69	0.48	0.30	0.21
MergeSortPv2_omp	1.38	1.28	0.95	0.81	0.72	0.57



**Figure 4.** Speedup and efficiency for the shared memory MergeSort implementations using OpenMP. The dotted line is the linear speedup.

The results of the performance analysis indicate that the `MergeSortPv1_omp.c` implementation showed a high speedup when using a small number of threads ( $\leq 3$ ). However, as the number of threads increased, the implementation deviated from the theoretically optimal performance given by the linear speedup. Using four threads, the efficiency dropped below 0.7. Moreover, when using more than 20 threads, the speedup tended to stagnate. This result aligns with Amdahl's Law, which suggests that sequential work becomes a limiting factor despite the availability of additional processing units. For the considered implementation, the limiting factor is the linear-cost merge operation, which acts as the bottleneck of the implementation.

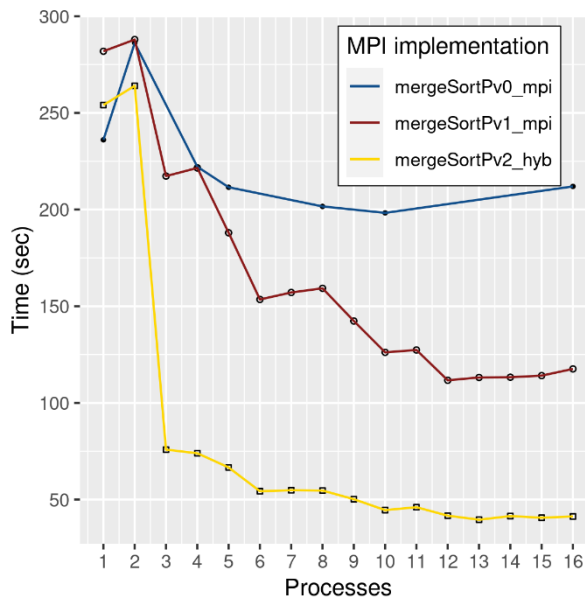
In contrast, the `MergeSortPv2_omp.c` implementation demonstrated a remarkable speedup with consistent growth. Unlike the previous implementation, it showed no signs of stagnation and achieved the maximum speedup value when using the largest number of threads (39). However, it is anticipated that this upward trend will diminish or even reverse as the number of threads further increases. The efficiency of this implementation only dropped below 0.7 when using more than 20 threads.

**Distributed-memory implementations.** Table 4 reports the average execution times of the distributed memory implementations of MergeSort using MPI. Figure 5 graphically presents the evolution of execution times.



**Table 4.** Execution time (s) for different number of computing resources (processes) for distributed memory MPI MergeSort implementations.

implementation	computing resources				
	1	2	4	8	16
MergeSortPv0_mpi	236.06	286.17	222.13	201.62	211.97
MergeSortPv1_mpi	281.88	287.91	221.54	159.27	117.59
MergeSortPv2_hyb	254.05	264.01	73.97	54.68	41.29



**Figure 5.** Execution times for distributed memory MPI MergeSort implementations.

Tables 5 and 6 report the speedup and efficiency of the distributed memory MergeSort implementations using MPI. Figure 6 graphically presents the speedup and efficiency as a function of the number of computing resources/processes.

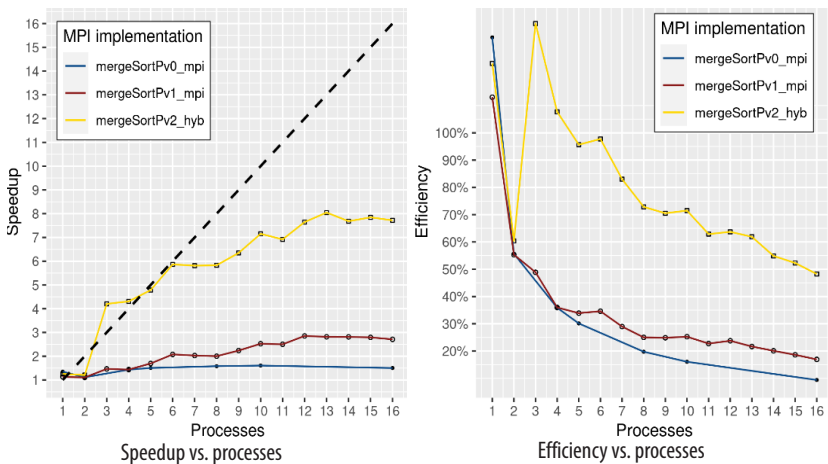
**Table 5.** Speedup of distributed memory MPI MergeSort implementations.

implementation	speedup				
	$S_1$	$S_2$	$S_4$	$S_8$	$S_{16}$
MergeSortPv0_mpi	1.35	1.11	1.43	1.58	1.50
MergeSortPv1_mpi	1.13	1.11	1.44	2.00	2.71
MergeSortPv2_hyb	1.25	1.21	4.31	5.83	7.72



**Table 6.** Efficiency of distributed memory MPI MergeSort implementations.

implementation	efficiency				
	$E_1$	$E_2$	$E_4$	$E_8$	$E_{16}$
MergeSortPv0_mpi	1.35	0.56	0.36	0.10	0.09
MergeSortPv1_mpi	1.13	0.55	0.36	0.25	0.17
MergeSortPv2_hyb	1.25	0.60	1.08	0.73	0.48



**Figure 6.** Speedup and efficiency for distributed memory MergeSort implementations using MPI. The dotted line is the linear speedup.

The results of the performance analysis indicate that the speedup achieved by the `MergeSortPv0_mpi.c` implementation was notably poor. Comparatively, the `MergeSortPv1_mpi.c` implementation demonstrated a slightly improved speedup, but its growth rate remained quite slow. On the other hand, the hybrid implementation `MergeSortPv2_hyb.c`, despite initially exhibiting unexpectedly poor performance when using only two processes, showed a better performance overall as the number of processes increased. This is a relevant result since the hybrid implementation was executed on different computing nodes, implying that the other developed implementations had not experienced significant inter-node communication costs.

When comparing the two groups of implementations, it is evident that superior results were achieved using OpenMP. In fact, the best-performing MPI-based implementation was the hybrid approach that combined MPI with OpenMP. Both groups had specific cases where superlinear speedup was achieved, i.e., the performance improvement exceeded the expected linear scaling. Overall, the utilization of OpenMP has proven to be more effective in terms of performance, and the presence of almost linear speedup values highlights the potential efficiency gains achievable through parallelization.



## CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

This article presented an empirical evaluation of parallel versions of MergeSort, applying shared memory and distributed memory approaches.

The standard MergeSort algorithm has inherent parallelizability, primarily because of the independence of its recursive calls. Both theoretical analysis and experimental evidence suggest that even greater advantages are achievable by recognizing the parallel nature of the merging operation, besides the recursive calls in MergeSort.

The empirical analysis of the developed parallel implementations demonstrated that the most favorable performance results were obtained when using a shared memory implementation using OpenMP, in line with previous results from related works. Regarding distributed memory implementations, the best performance results were achieved by a hybrid implementation executing on different computing nodes.

The main lines for future work are related to extending the empirical evaluation and analyzing the scalability for larger and different types of inputs, and analyzing methods for finding the best values of `CUT_OFF_1` and `CUT_OFF_2` parameters. In turn, a specific parallelization technique can be applied for distributed memory implementations to process the virtual process tree, adapted to parallelize the merge operation.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

José Solsona conceived the research and conducted the experiment. Sergio Nesmachnow contributed to the manuscript.

## CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest related to the publication of this article. All authors have read and approved the final manuscript and consent to its publication.

## REFERENCES

- [1] Knuth, D. E. (1997). *The art of computer programming, volume 3: Sorting and searching* (2nd ed.). Addison–Wesley.
- [2] Katajainen, J., & Träff, J. L. (1997). Algorithms and complexity. In *Proceedings of the 3rd Italian Conference on Algorithms and Complexity*.
- [3] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). *Introduction to algorithms* (3rd. ed.). The MIT Press.
- [4] Rolfe, T. J. (2010). A specimen of parallel programming: Parallel merge sort implementation. *ACM Inroads*, 1(4), 72–79. <http://doi.org/10.1145/1869746.1869767>
- [5] Radenski, A. (2011). Shared memory, message passing, and hybrid merge sorts for standalone and clustered SMPs. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA'11)* (pp. 367–373).
- [6] Duvanenko, V. (2011). Parallel merge sort. <https://duvanenko.tech.blog/2018/01/13/parallel-merge-sort/>
- [7] Axtmann, M., Bingmann, T., Sanders, P., & Schulz, C. (2015). Practical massively parallel sorting. In *Proceedings of the 27th ACM symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures* (pp. 13–23). <https://doi.org/10.1145/2755573.2755595>
- [8] Nesmachnow, S., & Iturriaga, S. (2019). Cluster-UY: Collaborative scientific high performance computing in Uruguay. In M. Torres & J. Klapp (Eds.), *Supercomputing* (pp. 188–202). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-38043-4\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38043-4_16)

## Efficiency in the classification of chest X-ray images through generative parallelization of the Neural Architecture Search

Félix Armando Mejía Cajicá<sup>1\*</sup>, John A. García Henao<sup>2</sup>, Carlos Jaime Barrios Hernández<sup>3</sup>, Michel Riveill<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidad Industrial de Santander (UIS), Supercomputación y Cálculo Científico. UIS (SC3UIS), Grupo de Computación Avanzada y de Gran Escala (CAGE). Bucaramanga, Santander, Colombia.

<sup>2</sup> University of Bern: Bern, Switzerland.

<sup>3</sup> Universidad Industrial de Santander (UIS), Supercomputación y Cálculo Científico. UIS (SC3UIS), Grupo de Computación Avanzada y de Gran Escala (CAGE). Bucaramanga, Santander, Colombia.

<sup>4</sup> A Université Côte d'Azur, Laboratoire I3S, 06900 SA, France.

\*Autor para correspondencia/Corresponding author: [felix2067165@correo.uis.edu.co](mailto:felix2067165@correo.uis.edu.co)

## Eficacia en la clasificación de imágenes de rayos X de tórax mediante la paralelización generativa de la búsqueda de arquitectura neuronal

### Resumen

GenNAS permite la clasificación de radiografías de tórax en enfermedades pulmonares, aprovechando nuevos métodos de entrenamiento paralelo para una mayor precisión y eficiencia. La clasificación de imágenes médicas para patologías pulmonares a partir de radiografías de tórax tradicionalmente requiere mucho tiempo. GenNAS, utilizando las capacidades generativas de GPT-4, automatiza el aprendizaje de arquitecturas óptimas a partir de los datos. Este estudio utiliza la paralelización y los algoritmos generativos para optimizar las arquitecturas de redes neuronales para la clasificación de radiografías de tórax, analizando su impacto en el algoritmo Neural Architecture Search NAS utilizando el conjunto de datos de CheXpert. El estudio utiliza el conjunto de datos CheXpert con 224,316 radiografías de tórax para clasificar cinco patologías de enfermedades pulmonares. GenNASXRays evalúa 6561 posibilidades de arquitectura en un espacio de búsqueda de 8 capas, con gráficos AUC-ROC y Precision-Recall como métricas. El algoritmo secuencial, que se entrenó en 187,641 imágenes, tardó 190,2 horas para obtener un AUC-ROC de 0,869. En ejecución paralela en dos GPU, se logró un AUC-ROC de 0,87 en 127,09 horas, lo que resalta la eficiencia de la paralelización.

**Palabras clave:** Radiografías de pulmón, modelos generativos, arquitectura paralela

### Abstract

Explore GenNAS for chest X-ray classification in lung diseases, leveraging novel parallel training methods for enhanced accuracy and efficiency. Medical image classification for pulmonary pathologies from chest X-rays is traditionally time-consuming. GenNAS, using GPT-4's generative capabilities, automates optimal architecture learning from data. This study investigates parallelization and generative algorithms to optimize



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Dennis Cazar

Recibido /  
Received:  
25/11/2024

Aceptado /  
Accepted:  
09/12/2024

Publicado en línea /  
Published online:  
09/05/2025



neural network architectures for chest X-ray classification, analyzing their impact on the NAS algorithm using the CheXpert dataset. The study uses the CheXpert dataset with 224,316 chest X-rays to classify five lung disease pathologies. GenNASXRays evaluates 6,561 architecture possibilities in an 8-layer search space, with AUC-ROC and Precision-Recall plots as metrics. Training on 187,641 images, the sequential algorithm took 190.2 hours to achieve an AUC-ROC of 0.869. In parallel execution on two GPUs, an AUC-ROC of 0.87 was achieved in 127.09 hours, highlighting the efficiency of parallelization.

**Keywords:** Chest X-ray images, Generative Models, Parallel architecture

---

## INTRODUCTION

Artificial intelligence (AI) has taken an important role in the field of medicine as a tool to help doctors make decisions, which is why the constant development of accurate and robust medical image classification models is necessary, especially in the diagnosis of lung pathologies from chest X-rays. Traditional medical image classification demands manual architecture design, a time-consuming process. GenNAS leverages GPT-4's generative capabilities to streamline this by learning optimal architectures directly from the data. This study investigates the potential of parallelization and generative algorithms to optimize neural network architectures for chest X-ray classification. It analyzes the impact of parallelization on the Neural Architecture Search (NAS) algorithm using the CheXpert dataset.

Indeed, parallelization is a critical technique in AI for healthcare that enables faster model training, efficient data processing, real-time decision-making, and the advancement of precision medicine. By harnessing the power of parallelization, AI systems can transform healthcare delivery and improve patient outcomes. However, it is important to highlight that parallelization and support of high-performance computing (HPC) architectures are just two aspects of AI for healthcare. These techniques are significant in medical imaging and diagnostics, virtual patient care, medical research and drug discovery, patient engagement and compliance, rehabilitation, and other administrative applications. Integrating AI into healthcare settings can revolutionize clinical decision-making, hospital operations, medical diagnostics, patient care, and more.

This study assesses the effectiveness of generative algorithms as a black box for designing optimal neural network architectures. Additionally, parallelization strategies with generative algorithms are implemented to expedite the search for accurate neural network architectures.

## STATE OF ART

Several research studies utilize the capabilities of Large Language Models (LLMs), such as GPT-4, to search for neural network architectures. Thanks to the powerful generative capability of GPT-4, a pioneering study called GENIUS [1] was conducted, which uses GPT-4 to design neural architectures for convolutional neural networks (CNNs). The main



idea is to allow GPT-4 to learn from the feedback of the generated neural architectures and generate better ones. Experimental results show that GPT-4 can find better-classified architectures after several repetitions of prompts. Subsequently, Automatic Machine Learning (AutoML)-GPT articles [2] design cues for GPT to automatically complete data processing tasks, model architecture design, and hyperparameter tuning. Some papers explore the mutual enhancement between LLM and AutoML articles [3].

In the present work, tests were conducted with Llama 2 and GPT-4. Among the issues with Llama 2 were that the results obtained were not formatted in a standard way, which made automation quite complex. Additionally, the model structures proposed by Llama 2 were not of the same quality as those obtained through GPT-4. GPT-4 allowed for standard formatting of outputs, and the proposed model structures were more robust, yielding better results.

HPC involves the use of multiple cores to support parallel processing. This processing can be massive or intensive. HPC supports AI in computer architecture design and organization. The well-known expression *Cambrian Explosion of Computing* for AI and Big Data [4] allows customizing computer architectures following requirements, in this case, with AI needs. Then, there are key points to observe:

- **Next-Generation HPC Systems:** Next-generation HPC systems and HPC architectures are raising the bar for computing and memory performance, I/O, and flexibility. These systems are designed to meet the increasing demands of HPC workloads, including AI and analytics. They draw from the cloud, supporting a diverse range of architectures, and compute models and scalings.
- **Unified and Open Programming Models:** Developers can use unified and open programming models, such as OneAPI, CUDA, or directives such as OpenACC to create a single codebase that can be used across different architectures, including CPUs, GPUs, and FPGAs. This approach enables more productive and performant development in the HPC and AI domains.
- **Convergence of AI and HPC:** The convergence of AI and HPC is an ongoing development. In real-world scenarios, AI architectures can be noisy, incomplete, and heterogeneous, and they may perform differently from benchmark results. Creating better mathematical frameworks for selecting AI architectures and optimizing their performance is an area of focus for future development.
- **Hybrid Workflows:** Hybrid workflows that combine traditional computing methods (i.e., simulation) with data science methods are becoming more efficient. For example, coupling legacy computational fluid dynamics (CFD) codes with AI libraries for forecasting or astrophysics can be a challenge, but advancements in HPC architectures, such as the use of GPUs or TPUs, enable the integration of AI and HPC more efficiently.
- **Challenges and Trade-offs:** There are challenges and trade-offs when it comes to AI and HPC configurations. AI-heavy workloads often prioritize speed over core count, while HPC workloads prefer greater compute performance with a high core count



and more core-to-core bandwidth. Developers face challenges in transitioning software to function on HPC clusters and efficiently programming high-performance parallel computing. It can require a significant time investment, and compatibility across different hardware types and computing models is important.

- Specialized Processing Units Acceleration\*\*: GPUs, TPUs, or QPUs play a crucial role in accelerating AI workloads within HPC environments. NVIDIA, for example, offers a complete end-to-end stack and suite of optimized products, infrastructure, and services for high-performance computing and AI workflows. Their full-stack architectural approach ensures optimal performance, fewer servers, and lower energy consumption, resulting in faster insights at lower costs [5]. On the other hand, we can observe the same for other companies, such as Intel. However, the more impressive option is using QPUs (Quantum Processing Units) to support AI algorithm implementations. Energy Sustainability: The convergence of energy sustainability and AI/HPC is an area of growing interest. Green energy and AI synergy, energy efficiency and sustainability [6], and frugality for AI/HPC implementations are popular topics in the specialized community [7].

HPC and AI revolutionize the healthcare sector, enabling faster and more accurate diagnoses. By leveraging the power of HPC and AI, healthcare professionals can improve patient care, enhance research capabilities, and optimize healthcare delivery. In computing terms, parallelization plays a crucial role in the field of AI, because it is unlikely to implement the different AI algorithms in today's efficient mode without HPC support. Observing AI for healthcare [8, 9, 10], the junction enables faster and more efficient model training, essential for developing and deploying AI models in healthcare applications. Some key points about the role of parallelization in AI for healthcare are:

- Accelerating Model Training: Parallelization allows for the simultaneous execution of multiple computational tasks, significantly speeding up AI model training. This is particularly important in healthcare applications requiring real-time responsiveness, such as medical image analysis, for quicker diagnosis and treatment planning.
- Handling Large Datasets: Healthcare generates and deals with large amounts of data, including medical records, imaging data, and genomic data. Parallelization enables the efficient processing and analysis of these large datasets, leading to more accurate and meaningful insights.
- Improving Efficiency: By leveraging parallelization techniques, AI systems can process and analyze data faster and at lower costs than traditional on-premises infrastructure [11]. This improved efficiency can help healthcare organizations optimize operations, reduce costs, and enhance patient care.
- Real-Time Decision-Making: Parallelization allows AI models to be trained and deployed in real-time, enabling healthcare professionals to make faster and more informed decisions. This is particularly valuable in critical situations where timely interventions can significantly impact patient outcomes.



- Advancing Precision Medicine: Parallelization supports the development of precision medicine, which aims to provide tailored healthcare interventions based on individual characteristics and needs. By accelerating model training, parallelization enables the analysis of large-scale datasets and the identification of personalized treatment strategies.

It is important to note that parallelization is just one aspect of AI in healthcare. AI also plays a significant role in medical imaging and diagnostics, virtual patient care, medical research and drug discovery, patient engagement and compliance, rehabilitation, and other administrative applications. Integrating AI into healthcare settings can revolutionize clinical decision-making, hospital operations, medical diagnostics, patient care, and more.

## EXPERIMENTATION

We use a simple node of a specific HPC testbed machine and propose using specific materials and methods, as shown in the next subsections.

### HPC Infrastructure Testbed

We use a node with Intel i9-9900K 5.0 GHz processor, two (2) NVIDIA RTX 3090 24 GB Cards - GDDR6X, 384 bits CUDA, 10496 cores. The processor, the Intel Core i9-9900K, is a 9th-generation Intel Core i9 series processor with the key specifications:

- Cache: It has a 16 MB cache.
- Clock speed: It can reach a clock speed of up to 5.00 GHz.
- Cores: It has 8 cores and 16 threads.
- Manufacturing technology: It is manufactured using the 14 nm process.
- Compatibility: It is compatible with the LGA 1151 socket.

It is important to observe that cache coherence is an important feature in this configuration because the node is a multiprocessor system where multiple processors or cores share a common memory. In the AI applications of this work, cache coherence plays a crucial function in ensuring the consistency of shared data across different caches, which is essential for accurate and reliable computation.

The GeForce RTX™ 3090 is a big ferocious GPU (BFGPUs) with TITAN class performance. Powered by Ampere—NVIDIA's 2<sup>nd</sup>-generation RTX architecture—they double down on ray tracing and AI performance with enhanced Ray Tracing Cores, Tensor Cores, and new streaming multiprocessors. Plus, they feature a staggering 24 GB of G6X memory, all to deliver the ultimate experience for gamers and creators. These are some of the specifications of the NVIDIA RTX 3090:

- Memory: They have 24 GB of GDDR6X memory.
- Memory bandwidth: They have a 384-bit bus and a memory bandwidth of 936.2 GB/s.
- CUDA cores: They have 10496 CUDA cores.
- Tensor Cores: They have 328 3rd-generation Tensor Cores.
- RT Cores: They have 82 2nd-generation RT Cores.



Tensor and RT Cores are specialized hardware components found in NVIDIA GPUs, specifically in their Turing architecture and later generations. These cores serve different purposes and are designed to accelerate specific tasks in AI applications and graphics rendering. Observing the Tensor Cores, they are processing units that are specifically optimized for matrix multiplication and deep learning operations. They can perform mixed-precision matrix operations at a much faster speed than traditional GPU cores. Tensor Cores benefit AI applications involving neural networks and deep learning algorithms. They can significantly accelerate tasks such as training and inference in deep learning models, resulting in faster performance and improved efficiency. Frameworks like TensorFlow utilize Tensor Cores to accelerate AI computations. They are available in limited GPUs, including the GeForce RTX, Quadro RTX, and Titan families. By leveraging the power of Tensor Cores, these GPUs can deliver enhanced performance in AI, gaming, and content creation applications.

On the other hand, RT Cores are specialized cores designed for real-time ray tracing. Ray tracing is a rendering technique that simulates the behavior of light in a scene, resulting in more realistic and accurate graphics. RT Cores are responsible for accelerating the ray tracing calculations and improving the efficiency of rendering complex lighting effects. They can calculate the paths of light rays and handle tasks such as intersection testing and shadow calculations, which are essential for realistic rendering. Like the Tensor Cores, the RT Cores are a key feature of NVIDIA's Turing architecture and subsequent generations. They enable real-time ray tracing capabilities in GPUs, allowing for more immersive and visually stunning graphics in games and other applications. In this work, we do not use the RT Cores, but the Tensor Cores.

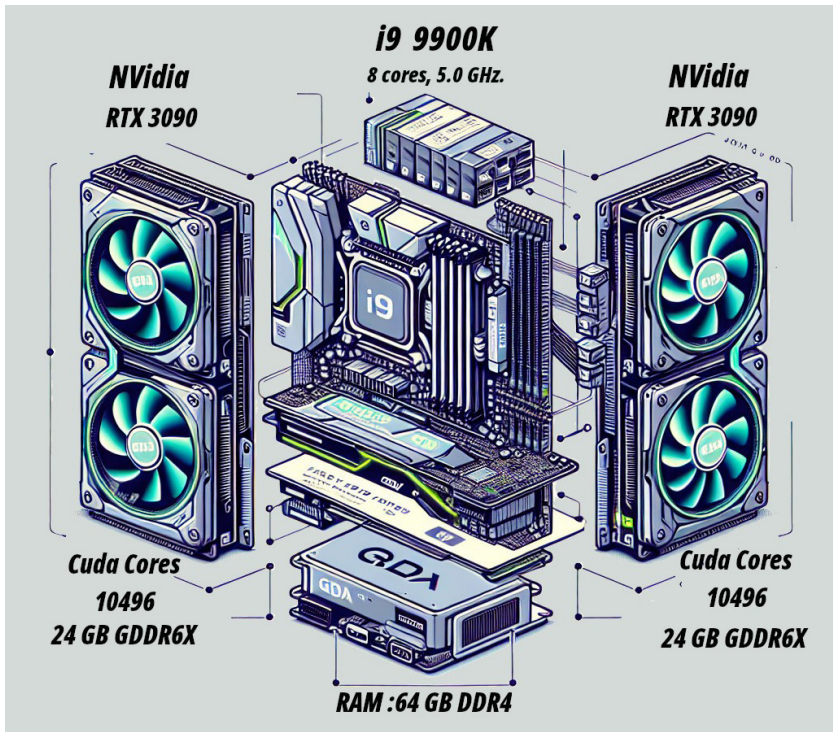
Because Tensor Cores are specialized hardware components optimized for matrix multiplication and deep learning operations, while RT Cores are designed for real-time ray tracing, both Tensor Cores and RT Cores contribute to NVIDIA GPUs' enhanced performance and capabilities in AI applications and graphics rendering. However, for this study, the performance guarantee by the Tensor Cores is more relevant.

The NVIDIA RTX 3090s are high-performance graphics cards primarily designed for creation and intensive gaming tasks. They are also used in specialized clusters for AI, visualization, and scientific computing. This node was selected because it could correspond to a professional workstation configuration. Other nodes in a cluster can be used to increase the amount of data or intensive processes. Still, for this work, only one was selected since we were interested in the parallelization factor in the processing cores for both the CPU and the GPU/TPU. However, several aspects related to internode interconnectivity must be considered.

We use a hybrid platform based on CPU/GPU/TPUs, and it is important to discuss the CPU at this point. The Intel Core i9-9900K processor has a base clock speed of 1.2 GHz and is an octa-core processor with 16 threads, belonging to Intel's 9th generation of CPUs. The i9-9900K is known for its high performance and is often used in high-performance computing, low-cost nodes, gaming, and high-end desktop systems.

The processor features Intel Turbo Boost Technology 2.0, which allows it to dynamically increase its clock speed when needed, boosting performance for demanding tasks. It

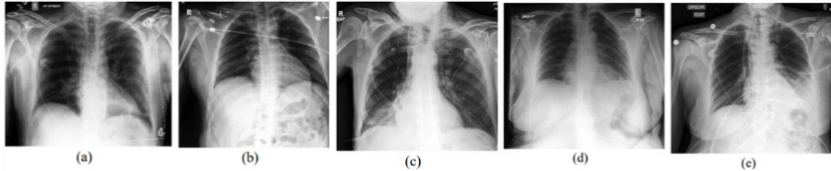
also supports Intel Hyper-Threading Technology, which enables each physical core to handle two threads simultaneously, improving multitasking capabilities. For this study, this is important due to its support for intensive calculations.



**FIGURE 1.** Computer Node Testbed Architecture: A hybrid computer using Intel CPUs and NVIDIA GPU/TPUs.

## MATERIALS AND METHODS

The CheXpert dataset contains 224,316 chest X-rays from 65,240 patients who underwent radiographic examination at the Stanford University Medical Center between October 2002 and July 2017. Both inpatient and outpatient X-rays are included, labeled according to the presence of 14 observations as positive, negative, or uncertain. The prediction task classifies five lung disease pathologies: atelectasis, cardiomegaly, consolidation, edema, and pleural effusion.



**FIGURE 2.** X-rays for each of the selected pathologies. (a) Atelectasis, (b) Cardiomegaly, (c) Consolidation, (d) Edema, (e) Pleural Effusion.

The structure of the prompt supplied to GPT-4 is the following:

Operations that allow use for each layer, the architecture of the 12 layers determining which are already defined and which are not, as shown in Table 1, and requesting the best architecture as a list of IDs based on the 3 operations, which allows obtaining better model performance. The results obtained with already trained models are provided. The next table shows the macrostructure of the search space.

**TABLE 1.** Macro structure of search space.

n	Input	Block	Channel	Stride
1	32x32x3	3x3	32	1
2	32x32x32	Choice block	64	2
3	32x32x64	Choice block	128	2
3	8x8x128	Choice block	256	2
1	4x4x256	1x1 conv	1280	1
1	4x4x1280	Global avgpool	-	-
1	1280	FC	5	-

The performance of the optimal architecture identified by the GenNASXRays generative model was evaluated in a benchmark test widely used in the NAS field. The search space is made up of eight search layers, where each layer contains three candidate blocks. These blocks are marked as zero (0) for Identity connection (encoded as '0'), one (1) for MobileNetV2 block with kernel size 3 and expansion ratio 3 (MB3\_K3), and two (2) for MobileNetV2 block with kernel size 5 and expansion ratio 6 (MB6\_K5). This creates a search space of  $38 = 6,561$ .

With this experimentation over the selected testbed computing platform, interesting results can be shown and a discussion started, as shown in the next section.

## RESULTS AND DISCUSSION

The training dataset used is 187,641 images for training and 7,505 images for testing. Each architecture is trained for 50 epochs using a standard SGD optimizer with a learning rate of 0.0004, a decay factor of 0.97, a batch size of 24, and a momentum of 0.9. These models



were trained in their sequential version on a PC with processor i9-9900K, memory RAM of 64 Gigabytes, and GPU RTX 3090 24 GB, with 50 epochs because this was sufficient enough in terms of precision. Additional epochs did not improve the final precision and instead increased the computational cost. In the sequential execution of GenNAS with 10 iterations, the optimal neural network architecture was determined in the fifth iteration. This process took a total machine time of 190.2 hours, resulting in an AUC-ROC of 0.869, with the identified neural network structure being [2,2,1,2,1,2,1,1], shown in Table 2.

For execution in serial mode, the LLM is asked to recommend a neural network structure based on the macrostructure shown in Table 1, considering the three candidate blocks for each layer. Once a structure is recommended, it is trained and validated to determine the accuracy achievable with the generated model, as shown in Table 2.

Once this new model is trained, the LLM is asked again to recommend a new structure that might achieve better accuracy, given the results obtained with the previous architectures. The process is repeated until the accuracies no longer improve and plateau. At this point, the best model is determined as the one with the highest accuracy based on the AUC-ROC.

**TABLE 2.** Experiment results serial GenNAS.

Iteration	Architecture	AUC-ROC	Parameters	Memory [MBytes]	Time [Hours]
1	1,1,2,1,2,1,2,2	0.86	540741	2.16	15.139
2	2,1,2,1,2,1,2,1	0.82	750981	3	36.592
3	1,2,1,1,2,1,2,2	0.86	2274629	9.1	94.161
4	2,1,1,2,1,2,1,1	0.86	2234021	8.94	140.744
5	2,2,1,2,1,2,1,1	0.87	2702405	10.81	190.231
6	1,1,2,1,2,1,1,2	0.85	1806245	7.23	234.292
7	2,2,1,2,1,1,2,2	0.86	2253701	9.02	285.153

For parallel training execution, for each iteration, the LLM recommends two model structures which are then trained and evaluated on each GPU, determining the AUC-ROC for each trained model. The LLM is then asked again to recommend two new model structures based on the accuracies obtained previously, and this process continues until no further improvements in accuracy are made.

In contrast, during parallel execution of GenNAS with five iterations and the same computational specifications, including adding a second GPU (RTX 3090), two models were concurrently trained per iteration. This parallel approach yielded excellent results, achieving an AUC-ROC of 0.87 in the third iteration and completing in an execution time of 127.09 hours. Notably, this parallel strategy allowed for obtaining the optimal neural network structure [1,2,1,2,2,1,2,2] in a significantly shorter time than the sequential approach, as shown in Table 3. This demonstrates a substantial improvement in efficiency when employing parallelization, resulting in faster convergence to an accurate neural network architecture.

**TABLE 3.** Experiment results parallel GenNAS.

Iteration	Architecture	AUC-ROC	Parameters	Memory [MBytes]	Time [Hours]
1	1,0,1,0,0,1,0,0	0.82	540,741	2.16	19.59
	1,0,2,0,0,2,0,0	0.82	750,981	3	
2	1,2,1,2,2,1,2,1	0.86	2,274,629	9.1	77.36
	2,1,2,1,1,2,1,2	0.86	2,234,021	8.94	
3	1,2,1,2,2,1,2,2	0.87	2,702,405	10.81	127.09
	2,1,2,1,1,2,1,1	0.85	1,806,245	7.23	
4	1,2,2,1,1,2,2,1	0.85	2,253,701	9.02	177.95
	2,1,1,2,2,1,1,2	0.86	2,254,949	9.03	
5	1,2,2,1,1,2,2,2	0.86	2,681,477	10.73	225.51
	2,1,1,2,2,1,1,1	0.86	1,827,173	7.31	

The classification of chest X-ray images has been approached using different algorithms and machine-learning techniques. One common approach is the use of convolutional neural networks (CNNs). CNNs are deep neural networks that are well-suited for image classification tasks. They can automatically learn features from the input images and make predictions based on them.

Generative parallelization of the Neural Architecture Search (NAS) is a technique that aims to improve the efficiency of the classification process. NAS involves automatically searching for the optimal neural network architecture for a given task. By parallelizing the search process, we can explore a larger space of possible architectures and find more efficient models. However, it is necessary to observe computer features to support parallelization in an energy-efficient manner.

Many research studies have focused on developing techniques to improve the efficiency of chest X-ray image classification. These include the generative parallelization of Neural Architecture Search and the augmentation of training data using generative adversarial networks. These techniques aim to enhance the performance of CNN classifiers and enable more accurate and efficient diagnoses of chest X-ray images.

### Further Work

As known, the convergence of HPC infrastructures and AI can potentially revolutionize healthcare. By leveraging HPC's speed and power, combined with AI's capabilities, significant advancements can be made in various aspects of healthcare.

Although we have been explicit in the application in the previous section, we are currently experimenting with four important aspects related to the architecture: energy



efficiency, deployment, scalability (without sacrificing energy efficiency and accuracy), and hybrid processing. The latter involves the analysis of massively and intensive parallel workloads and the simultaneous support of different processing units.

## **AUTHOR CONTRIBUTIONS**

Félix Armando Mejía Cajicá conducted the research on existing literature and also implemented the source code necessary for running the performance tests and generating deep learning model structures used in this study. John Anderson García Henao contributed to test design, deep learning model structure generation strategies, and the development of parallelization algorithms. Carlos Jaime Barrios Hernández and Michell Riveill supervised the research, participated in reviewing and refining this article, and helped define parallelization strategies.

## **CONFLICT OF INTERESTS**

The authors declare no conflict of interest.

## REFERENCES

- [1] Zheng, M., Su, X., You, S., Wang, F., Qian, C., Xu, C., & Albanie, S. (2023). Can GPT-4 perform neural architecture search? *arXiv preprint arXiv:2304.10970*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.10970>
- [2] Zhang, S., Gong, C., Wu, L., Liu, X., & Zhou, M. (2023). AutoML-GPT: Automatic Machine Learning with GPT. *arXiv preprint arXiv:2305.02499*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.02499>
- [3] Tornede, A., Deng, D., Eimer, T., Giovanelli, J., Mohan, A., Ruhkopf, T., Segel, S., Theodorakopoulos, D., Tornede, T., Wachsmuth, H., & Lindauer, M. (2023). AutoML in the age of Large Language Models: Current challenges, future opportunities and risks. *arXiv preprint arXiv:2306.08107*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.08107>
- [4] Matsuoka, S. (2018, June). Cambrian explosion of computing and big data in the post-Moore era. In *Proceedings of the 27th International Symposium on High-Performance Parallel and Distributed Computing* (pp. 105-105). <https://doi.org/10.1145/3208040.3225055>
- [5] Onwusinkwue, S., Osasona, F., Ahmad, I. A. I., Anyanwu, A. C., Dawodu, S. O., Obi, O. C., & Hamdan, A. (2024). Artificial intelligence (AI) in renewable energy: A review of predictive maintenance and energy optimization. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(1), 2487-2799. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.1.0347>
- [6] Hidalgo, I., Fernández-de\_Vega, F., Ceberio, J., Garnica, O., Velasco, J. M., Cortés, J. C., Villanueva, R., & Díaz, J. (2023). Sustainable artificial intelligence systems: An energy efficiency approach. *TechRxiv*. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.24610899>
- [7] Rao, B. C. (2024). Frugal computing for artificial intelligence and other applications. In *Frugal engineering. Design science and innovation*. Springer. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-99-9700-8\\_11](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-99-9700-8_11)
- [8] Al Kuwaiti, A., Nazer, K., Al-Reedy, A., Al-Shehri, S., Al-Muhanna, A., Subbarayalu, A. V., Al Muhanna, D., & Al-Muhanna, F. A. (2023). A review of the role of artificial intelligence in healthcare. *Journal of Personalized Medicine*, 13(6), 951. <https://doi.org/10.3390/jpm13060951>
- [9] Bajwa, J., Munir, U., Nori, A., & Williams, B. (2021). Artificial intelligence in healthcare: transforming the practice of medicine. *Future Healthcare Journal*, 8(2), e188-e194. <https://doi.org/10.7861/fhj.2021-0095>
- [10] Davenport, T., & Kalakota, R. (2019). The potential for artificial intelligence in healthcare. *Future Healthcare Journal*, 6(2), 94-98. <https://doi.org/10.7861/futurehosp.6-2-94>
- [11] Calciu, I., Talha Imran, M., Puddu I., Kashyap, S., Al Maruf, H., Mutlu, O., & Kolli, A. (2023). Using local cache coherence for disaggregated memory systems. *SIGOPS Oper. Syst. Rev.* 57, 1 (June 2023), 21–28. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 57(1), 21-28. <https://doi.org/10.1145/3606557.3606561>

## Study of syllogism in the paradigm of quantum logic

José David Bañuelos Aquino<sup>1\*</sup>, José Antonio Orizaga Trejo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Guadalajara, CUCEA, Zapopan, México, ORCID

\*Autor para correspondencia/Corresponding autho [david.banuelos@q-team.mx](mailto:david.banuelos@q-team.mx)

## Estudio del silogismo en el paradigma de la lógica cuántica

### Abstract

The present document aims to lay the foundations for an inferential logical reasoning system in the paradigm of quantum computing by using hypothetical syllogisms in its different figures. Using the implication gate in the form Jauch, a quantum algorithm was developed that performs the operation analogous to the hypothetical syllogism within the paradigm of quantum logic. Depending on the order of its premises, it can be treated as an inductive, deductive, or abductive syllogism. The results of the execution of this algorithm were obtained using the quantum circuit simulator Q-team.

**Keywords:** Quantum information theory, quantum computation, quantum implication operation, quantum syllogism, Q-Team.

### Resumen

El presente documento tiene como objetivo sentar las bases para un sistema de razonamiento lógico inferencial en el paradigma de la computación cuántica mediante el uso de silogismos hipotéticos en sus diferentes figuras. Utilizando la compuerta de implicación en la forma Jauch, se desarrolló un algoritmo cuántico que realiza la operación análoga al silogismo hipotético dentro del paradigma de la lógica cuántica. Dependiendo del orden de sus premisas puede ser tratado como un silogismo inductivo, deductivo o abductivo según sea el caso. Los resultados de la ejecución de este algoritmo se obtuvieron utilizando el simulador de circuitos cuánticos Q-Team.

**Palabras clave:** Teoría de la información cuántica, computación cuántica, operación de implicación cuántica, silogismo cuántico, Q-Team.

## INTRODUCTION

With the rise of technologies in quantum computing, as well as artificial intelligence, we find an area of opportunity within the development of intersectional systems between these two fields. However, although it is possible to note certain parallels between the ways of developing algorithms using logical operations, we find that there is no one-to-one analogy between the different operations that exist in both paradigms. Therefore, it is necessary to define the bases that allow us to develop quantum algorithms from traditional definitions that facilitate the creation of intelligent systems.



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Dennis Cazar

Recibido /  
Received:  
28/11/2024

Aceptado /  
Accepted:  
09/12/2024

Publicado en línea /  
Published online:  
14/05/2025



In this paper we show the development of an inferential reasoning algorithm based on syllogisms, using a definition of propositional logic approached from the paradigm of quantum logic, which was tested using the quantum algorithms simulator Q-Team.

## REASONING

### What is reasoning?

Reasoning is the mental process by which the relationship between two premises, ideas, concepts, facts, or data is established to generate information and create a conclusion; the conclusion of this reasoning can be true or false, and depending on the criterion applied to it, it is valid or not. Reasoning allows you to analyze and form your own criteria, expanding the knowledge acquired without resorting to experience. Likewise, it represents the middle point between instinct and thought.

Depending on the type of mechanisms employed during this process, the reasoning can be divided into:

#### Logical reasoning:

In logical reasoning, the conclusion is implicit in the premises that compose it. Likewise, depending on the form or structure of the premises, different forms of logical reasoning can be found.

- **Deductive:** The conclusion is obtained from the premises. Example: "All human beings are mortal. Socrates is a human being. Therefore, Socrates is mortal."
- **Inductive:** The conclusion is obtained from the premises, but not necessarily. Example: "The sun has risen every day of history. Therefore, it is likely to come out tomorrow."
- **Abductive:** The most plausible explanation for a phenomenon is sought. Example: "There are footprints of mud on the ground. Therefore, it is likely that it rained."

#### Non-logical reasoning:

In non-logical reasoning, the conclusion is not necessarily implicit in the premises, so it is necessary to resort to context and/or experience to obtain a conclusion. [1, 2]

### The syllogism

It is an inferential reasoning method that uses two premises to generate a conclusion, as can be seen in the following example:

Major premise:	All humans are mortal
Minor premise:	Frank is human
Conclusion:	Frank is mortal



These premises are composed of three terms (major, middle, and minor) whose order and presence within the premises allow us to reach a conclusion that consists of a third premise in which the middle term will not appear. Below, the distribution of the terms in the previous example is shown.

Major term	<u>All humans are mortal</u>
Middle term	<u>Frank is human</u>
Minor term	<u>Frank is mortal</u>

Both premises and terms are subject to rules that are described below:

### Rules of premises:

1. The major premise contains a major term and a middle term.
2. The minor premise contains a minor term and a middle term.
3. The conclusion contains the minor term and the major term in that order.

### Rules of terms:

The syllogism consists of 3 terms: Major, Middle, and Minor

1. No term can be more extensive in conclusion than in premises.
2. The middle term should not appear in the conclusion.
3. The middle term should appear in the major and minor premise.

The relationship between the different terms within the premises is established using judgments based on prepositions with which it is possible to evaluate the validity of the conclusions generated. These mechanisms are described by the operators of the propositional logic that will be addressed in detail in the next section. These mechanisms must adhere to the following rules.

### Rules of prepositions:

Two negative premises do not give a conclusion.

1. Two affirmative premises do not give a negative conclusion.
2. Two particular premises do not give a conclusion.
3. Conclusion always is next to the weaker party.

Through these we build the different figures of the syllogism (deductive, inductive, and abductive), and we find four different forms as can be seen in the following tables: [1, 2]



**TABLE 1.** Deductive Syllogism.

Figure 1	Figure 2	Figure 3	Figure 4
$m \rightarrow T$	$T \rightarrow m$	$m \rightarrow T$	$T \rightarrow m$
$t \rightarrow m$	$t \rightarrow m$	$m \rightarrow t$	$m \rightarrow t$
$t \rightarrow T$	$t \rightarrow T$	$t \rightarrow T$	$t \rightarrow T$

**TABLE 2.** Inductive Syllogism.

Figure 1	Figure 2	Figure 3	Figure 4
$m \rightarrow t$	$m \rightarrow T$	$T \rightarrow m$	$t \rightarrow m$
$m \rightarrow T$	$m \rightarrow t$	$m \rightarrow t$	$m \rightarrow T$
$t \rightarrow T$	$t \rightarrow T$	$t \rightarrow T$	$t \rightarrow T$

**TABLE 3.** Abductive Syllogism.

Figure 1	Figure 2	Figure 3	Figure 4
$T \rightarrow m$	$m \rightarrow T$	$t \rightarrow m$	$m \rightarrow t$
$t \rightarrow m$	$t \rightarrow m$	$T \rightarrow m$	$T \rightarrow m$
$t \rightarrow T$	$t \rightarrow T$	$t \rightarrow T$	$t \rightarrow T$

### Propositional logic

Propositional logic is a formal system that allows us to perform operations on statements or sets of data using logical operators that allow us to obtain the degree of veracity of these, as shown in the following table:

**TABLE 4.** Basic operations of propositional logic.

Operator	Notation	General Application	Truth Table	
			A	$\neg A$
Negation	$\neg$	A = Socrates is mortal. $\neg A$ = Socrates is not mortal.	V	F
			F	V
Conjunction	$\wedge$	A = Socrates is mortal. B = Zeus is immortal. $A \wedge B$ = Sócrates is mortal, and Zeus is immortal.	AB	$A \wedge B$
			FF	F
			FV	F
			VF	F
			VV	V



Operator	Notation	General Application	Truth Table	
			AB	AVB
Disjunction	<b>V</b>	A = Socrates is mortal. B = Zeus is immortal. AVB = Sócrates is mortal, or Zeus is immortal.	FF	F
			FV	V
			VF	V
			VV	V
Implication	<b>→</b>	A = Today is Monday. B = Tomorrow is Tuesday. <i>A→B = If today is Monday, then tomorrow is Tuesday.</i>	<b>AB</b>	<b>A→B</b>
			FF	V
			FV	V
			VF	F
Biconditional	<b>↔</b>	A = Today is Monday. B = Tomorrow is Tuesday. <i>A↔B = Today is Monday if and only if tomorrow is Tuesday.</i>	<b>AB</b>	<b>A↔B</b>
			FF	V
			FV	F
			VF	F
			VV	V

Likewise, with these operators we can build more complex definitions, which can be used to evaluate the type of reasoning we are working with, provided that the rules defined for it (prepositions, premises, and terms) are met. [1, 2]

### The implication

As was described in the previous section, the implication is a prepositional operator that allows us to establish the cause-effect relationship (if, then) of two premises. This in turn can be defined in different ways within prepositional logic. However, any definition can be reduced in the following fundamental ways:



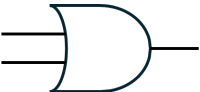
- Jauch:  $A \rightarrow B = \neg AVB$  (1)
- Sasaki Hook:  $A \rightarrow B = \neg AV(AB)$  (2)
- Dishkant:  $A \rightarrow B = BV(\neg B \wedge \neg A)$  (3)
- Kalmbach:  $A \rightarrow B = (\neg A \wedge B) \vee (\neg A \wedge \neg B) \vee (A \wedge (\neg AVB))$  (4)
- Non-Tollens:  $A \rightarrow B = (B \wedge \neg A) \vee (B \wedge A) \vee (\neg B \wedge (BV \neg A))$  (5)
- Relevance:  $A \rightarrow B = (A \wedge B) \vee (\neg A \wedge B) \vee (\neg A \wedge \neg B)$  (6)

With the conjunction, negation, and disjunction operators, we can develop any operation using these definitions. For the present work we will focus on the implication using the Jauch form. [2, 3, 4, 5]

### Combinational logic circuits

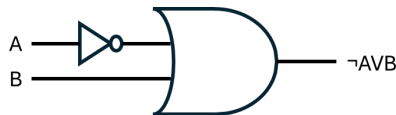
Combinational logic circuits are a set of logical gates that execute the logical operators corresponding to negation, union, and disjunction. These allow complex operations to be performed using the values zero and one, true and false, or another binary system.

**TABLE 5.** Basic operations of combinational logic circuits.

Operator	Notation	Truth Table	
Negation		<b>A</b>	<b><math>\neg A</math></b>
		1	0
		0	1
Conjunction		<b>AB</b>	<b><math>A \wedge B</math></b>
		00	0
		01	0
		10	0
		11	1
Disjunction		<b>AB</b>	<b><math>A \vee B</math></b>
		00	0
		01	1
		10	1
		11	1

These have technical applications within electronics and computing and are currently the basis of the operations on microprocessors.

With this we can define the implication in its Jauch form as the following combinational circuit:



**FIGURE 1.** Combinational circuit of the implication in its Jauch form.

## Quantum logic

Quantum logic is a formal system composed of operators that allow us to perform experiments using the principles of quantum mechanics used in quantum information theory that are presented below:

- **Quantum superposition.** This describes how a physical system such as a particle is in all its possible states simultaneously if the system is totally isolated and there is no observer to measure it. Depending on the existence or absence of an observer, the states can have the following properties:
  - **Coherence:** A quantum system is coherent when there is no observer to measure the system. If the system is coherent, it will be in all its states simultaneously.



- **Decoherence:** A quantum system is coherent or loses coherence when an observer measures it, and it acquires only one of its possible states.
- **Quantum entanglement.** This describes how two particles that are generated in the same event maintain the same state. If one changes, the other will change simultaneously, acquiring the same state as the other without the need of any physical connection and regardless of the distance between them. [6, 7, 8, 9, 10]

With these principles, a new computational system was proposed that could surpass the capabilities of classical computing by taking advantage of these properties.

### Dirac notation

Also called Bra-Ket notation because of the name of its elements, it denotes the quantum states of a system.

- **Bra:** represents a dual state which is obtained with the conjugate of the ket.

$$\langle \Psi | \tag{7}$$

- **Ket:** represents the state of the tax system which corresponds to a column vector. Its notation is as follows.

$$|\Psi\rangle \tag{8}$$

The operators are denoted by a representative letter with some emphasis:

$$\hat{U} \tag{9}$$

Therefore, an operation on a base state is described by the operator:

$$\hat{U} |\Psi\rangle \tag{10}$$

The projection of a state onto its own dual is defined as follows, where the result will always be equal to 1:

$$\langle \Psi | \Psi \rangle = 1 \tag{11}$$

On the other hand, if the projection of a state is made on the dual of a different one, the result will always be 0:

$$\langle \Omega | \Psi \rangle = 0 \tag{12}$$

### The space of states

Associated with any isolated physical system, there is a complex vector space with a defined internal product (Hilbert) or space of states of the system which are defined by its state vector. This vector is formalized in the space of the system. We find two types of states with which we define the physical system:



- **Basis state:** The states in which we can find the system. These have a vector representation.
- **General state:** The amplitude of probability to find the system in a base state.

Using Dirac notation we can describe fundamental states as follows:

$$|\Psi\rangle = \alpha|\uparrow\rangle + \beta|\downarrow\rangle \quad (13)$$

Where:

- $\Psi$  = System status.
- $\alpha$  and  $\beta$  = Complex numbers.
- $\uparrow$  and  $\downarrow$  = Basis states.

The above example shows the notation for a two-state system. The notation of the basis states can be defined as appropriate depending on their number.

The formalized vector in our Hilbert space is defined as follows:

$$|\Psi\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \quad (14)$$

### The qubit

The qubit is the fundamental unit of quantum information. It corresponds analogously to the bit used in classical computing. However, while the bit corresponds to electrical impulses that are interpreted in a binary way as 1 or 0, the qubit corresponds to a physical system of two basis states and has a representation similar to that of classical computing. It is denoted as:

$$\begin{aligned} |1\rangle &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}; |0\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\ \hat{H}|\Psi\rangle &= (1/\sqrt{2})|1\rangle + (1/\sqrt{2})|0\rangle \end{aligned} \quad (15)$$

As qubits are entangled, their vector representation will grow to a ratio where  $n$  is the number of qubits. They are written by obtaining the tensor product of the qubits involved.

It is graphically represented as a sphere-shaped Hilbert space known as the Bloch sphere, and its state will determine the value of the qubit.

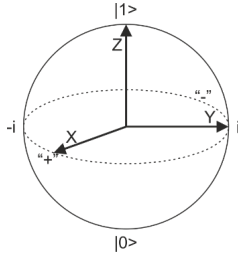


FIGURE 2. Axis on the Bloch sphere.

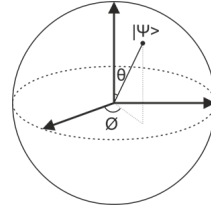


FIGURE 3. State in a Bloch sphere.

### Quantum gates

Quantum gates allow modifying the state of one or more qubits in a way analogous to logic gates. The following table shows the fundamental gates:

TABLE 6. Fundamental quantum gates.

Operator	Notation	General Application	Truth Table	
Pauli-X		$\hat{X} \doteq \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b \\ a \end{pmatrix}$	Q>	X Q>
			0>	1>
			1>	0>
Pauli-Y		$\hat{Y} \doteq \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -ib \\ ia \end{pmatrix}$	Q>	Y Q>
			0>	1>
			1>	0>
Pauli-Z		$\hat{Z} \doteq \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ -b \end{pmatrix}$	Q>	Z Q>
			0>	0>
			1>	-1>
Phase change		$\hat{P} \doteq \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ e^{i\theta}b \end{pmatrix}$	Q>	P Q>
			0>	0>
			1>	e <sup>iθ</sup> >
Hadamard		$\hat{H} \doteq \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} a+b \\ a-b \end{pmatrix}$	Q>	H Q>
			0>	( 0>+ 1>)/√2
			1>	( 0>- 1>)/√2
Controlled gate		$\hat{C}U \doteq \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ d \\ c \end{pmatrix}$	Q0Q1>	CX Q0Q1>
			00>	00>
			01>	01>
			10>	11>
			11>	10>

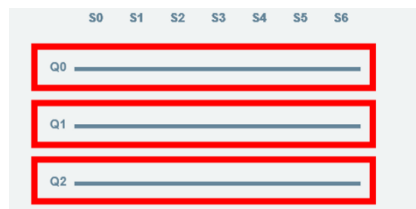
## Quantum algorithms

Quantum algorithms are analogous to a classical logic circuit; a quantum algorithm is a circuit that is composed of a set of quantum gates that operate on one or more qubits in one or more scenarios. [6]

### Qubit in a quantum algorithm

These are represented as horizontal lines in which we can add different quantum gates that will allow us to modify the state of the qubit. Depending on whether we use a controlled quantum gate or not, we can find the next kinds of qubits:

- Control qubits: depending on whether the qubit or qubits are in the basis state  $|1\rangle$ , the target qubits will perform the operation designated by the quantum gate being controlled.
- Target qubits: These are used to represent the output of gate operations, and it is in these that the operation will be performed if and only if the control qubit(s) are in the basis state  $|1\rangle$  that require control. These are usually initialized in  $|0\rangle$ . [6]



**FIGURE 4.** Qubits in a quantum algorithm.

### Scenarios

Scenarios are represented as vertical lines that intersect the qubits and correspond to the instants of time in which we can add a gate on a qubit. [6]



**FIGURE 5.** Scenarios in a quantum algorithm.

## Terminals

Terminals indicate what will be done in the last scenario of each qubit. There are two cases. [6]

**Measurement:** indicates that the measurement will be made in this qubit.



**FIGURE 6.** Measurement in a quantum algorithm.

- **Terminal:** indicates that this qubit will not have continuity in the circuit.



**FIGURE 7.** Terminal in a quantum algorithm.

## Quantum simulators

Quantum simulators are represented as vertical lines that intersect the qubits and correspond to the instants of time in which we can add a gate on a qubit. [1]

### Q-Team

Q-Team is a quantum circuit simulator developed as part of the master's thesis of the author of this project at the University of Guadalajara. It has a graphical interface that allows the circuits to be developed without the need to write a single line of code. Likewise, a programming framework can be used for users who feel more comfortable in a development environment. It also has three methods of operation that allow obtaining results from the generated circuits through the manual entry of the inputs, by a list of inputs, or using a module that obtains all possible input states. [6]

## Quantum algorithms from classical definitions

Although in both quantum logic and propositional logic we find that operators are used to modify the state or the information that we have at the beginning, there is no one-to-one analogy between these operators with the exception of negation and the Pauli X gate. However, quantum circuits can be built to perform analogous operations to those found in propositional logic, as long as the following rules are fulfilled.

- The circuit must have the same number of inputs as the number of inputs in the logic circuit, not counting the objective qubits.
- The measurement of results must be made on the same number of qubits as the outputs of the combinational logic circuit.
- The qubits to be observed must be identified.
- Target qubits will always be initialized in the  $|0\rangle$  basis state.
- There should be a one-to-one correspondence between the base states  $|0\rangle$  and  $|1\rangle$ , and binary states 0 and 1, respectively, both in the inputs and outputs.



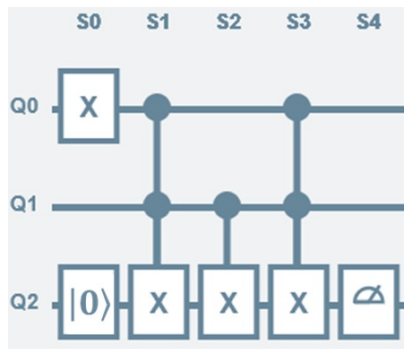
**TABLE 7.** Basic operations of combinational logic circuits.

Operator	Notation	Truth Table	Analogous quantum circuit	Truth Table
Negation		A $\neg A$		$ Q\rangle$ $X Q\rangle$
		1    0		$ 0\rangle$ $ 1\rangle$
		0    1		$ 1\rangle$ $ 0\rangle$
Conjunction		AB $A\wedge B$		$ Q_0Q_1Q_2\rangle$ $\wedge Q_0Q_1Q_2\rangle$
		00    0		$ 000\rangle$ $ 000\rangle$
		01    0		$ 010\rangle$ $ 010\rangle$
		10    0		$ 100\rangle$ $ 100\rangle$
		11    1		$ 110\rangle$ $ 111\rangle$
Disjunction		AB $A\vee B$		$ Q_0Q_1Q_2\rangle$ $\vee Q_0Q_1Q_2\rangle$
		00    0		$ 000\rangle$ $ 000\rangle$
		01    1		$ 010\rangle$ $ 011\rangle$
		10    1		$ 100\rangle$ $ 101\rangle$
		11    1		$ 110\rangle$ $ 111\rangle$

We can observe that for cases where there are two inputs and an output, there is a one-to-one relationship between inputs A and B with the inputs of the qubits of Q1 and Q2. Likewise there is a one-to-one relationship between the output of the operator with the output measurement of the qubit Q3.

In cases where there is only one input and one output, the qubit  $\alpha$  serves as an input, and it is also on this that the output is measured.

With the above we can define the quantum circuit analogous to the combinational of implication in its Jauch form as follows:



**FIGURE 8.** Quantum circuit of implication in its Jauch form.

**TABLE 8.** Quantum implication in its Jauch form truth table.

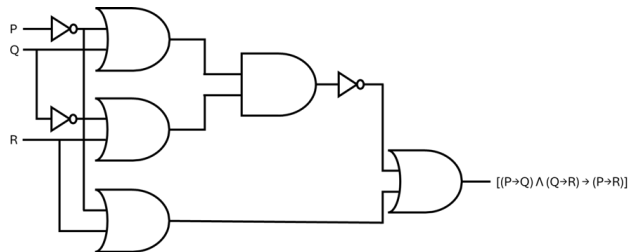
$ Q0Q1Q2 \rangle$	$ J_{\text{Jauch}} Q0Q1Q2 \rangle$
$ 000 \rangle$	$ 101 \rangle$
$ 010 \rangle$	$ 111 \rangle$
$ 100 \rangle$	$ 000 \rangle$
$ 110 \rangle$	$ 011 \rangle$

### The syllogism in the quantum logic

As previously mentioned, through propositional logic we can build any definition or algorithm from basic logical operations, so to develop the hypothetical syllogism the following definition will be used from implications:

$$[(P \rightarrow Q) \wedge (Q \rightarrow R)] \rightarrow (P \rightarrow R) \tag{16}$$

Where P, Q, and R are terms that can be ordered according to the way in which we are working. With this we can build a definition based on combinational logic circuits as follows:



**FIGURE 9.** A circuit of hypothetical syllogism using implication in its Jauch form.

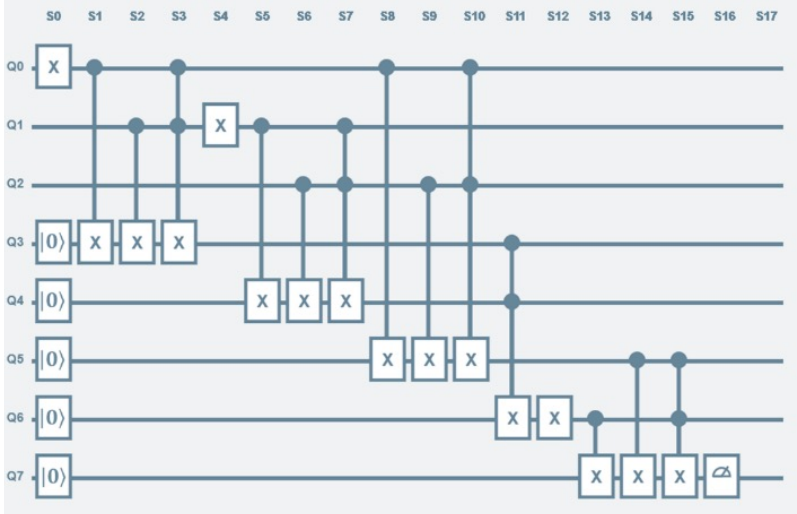
With the following associated truth table:

**TABLE 9.** Hypothetical syllogism truth table.

P	Q	R	$[(P \rightarrow Q) \wedge (Q \rightarrow R)] \rightarrow (P \rightarrow R)$
1	1	1	1
1	1	0	1
1	0	1	1
1	0	0	1
0	1	1	1
0	1	0	1
0	0	1	1
0	0	0	1



Using the methodology mentioned above to build a quantum circuit from classical definitions results in the following quantum algorithm:



**FIGURE 10.** Quantum circuit of the hypothetical syllogism in its Jauch form.

Where:  $Q_0=P$ ;  $Q_1=Q$ ;  $Q_2=R$

From the above, we take as inputs only those where the qubits  $Q_3$ ,  $Q_4$ ,  $Q_5$ ,  $Q_6$ , and  $Q_7$  are initialized in the base state 0, so our analogous truth table is as follows:

**TABLE 10.** Quantum circuit of the hypothetical syllogism in its Jauch form.

$ Q_0Q_1Q_2Q_3Q_4Q_5Q_6Q_7\rangle$	$[(P \rightarrow Q) \wedge (Q \rightarrow R) \rightarrow (P \rightarrow R)]$
$ 00000000\rangle$	$ 11011101\rangle$
$ 00100000\rangle$	$ 11111101\rangle$
$ 01000000\rangle$	$ 10010111\rangle$
$ 01100000\rangle$	$ 10111101\rangle$
$ 10000000\rangle$	$ 01001011\rangle$
$ 10100000\rangle$	$ 01101111\rangle$
$ 11000000\rangle$	$ 00010011\rangle$
$ 11100000\rangle$	$ 00111101\rangle$

Where  $Q_7$  is our observation qubit, and we see that both the classical and quantum outputs are tautological, so the circuit is analog.



## CONCLUSIONS

This algorithm represents a syllogism constructed with Jauch-shaped implication operations. To understand whether the form is deductive, inductive, or abductive, we must run experiments several times, and the result with the greatest amplitude of probability will define the shape and the figure.

To understand the functioning of the syllogism in its other forms and figures, it is necessary to construct the analogous circuits that represent them, as well as those constructed from the different forms of implication, which will be dealt with in later works.

Further work could develop a decision-making algorithm to select the indicated conclusion of a syllogism based on its probability amplitude and possible context variables.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

Mtro. José David Bañuelos Aquino & Dr. José Antonio Orizaga Trejo: conceptualization, data collection, data analysis, quantum algorithm development, manuscript writing, supervision and review and editing.

## CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there are no conflict of interest related to this work.



## REFERENCES

- [1] Ivorra Castillo, C. (n.d.). *Lógica y teoría de conjuntos*. Universitat de València. <https://www.uv.es/ivorra/Libros/TC.pdf>
- [2] Copi, I. M., & Cohen, C. (2019). *Introducción a la lógica* (14ª ed.). Limusa. [https://logicaformalunah.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/01/irving\\_m-\\_copi\\_carl\\_cohen\\_introduccion\\_a\\_la\\_log.pdf](https://logicaformalunah.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/01/irving_m-_copi_carl_cohen_introduccion_a_la_log.pdf)
- [3] Lungarzo, C. (n.d.). *La función de la llamada lógica clásica en la lógica cuántica*. Universidad Estatal de Campinas, Campinas.
- [4] Ezhov, A., Andrei, K., & Terentyeva, S. (2014). *On the quantum implication function and strategies for multi-agent models*. In PRIMA2014 *International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems*.
- [5] Megill, N. D., & Pavičić, M. (2003). Quantum implication algebras. *International journal of theoretical physics*, 42. <https://doi.org/10.1023/B:IJTP.0000006007.58191.da>
- [6] Bañuelos Aquino, J. D., & Orizaga Trejo, J. A. (2023). *Q-Team, simulador de circuitos cuánticos*. In J. A. Orizaga Trejo, M. Cruz Herrera, J. R. Beltrán Ramírez, M. Alarcón Romero, E. A. Ramos Aceves, J. D. Bañuelos Aquino, & J. Z. Orizaga Cruz, (eds.) *Procesos de madurez en desarrollos tecnológicos en posgrado con vinculación social* (pp. 115-146). Trauco. <https://www.amidibiblioteca.amidi.mx/index.php/AB/catalog/view/39/33/308>
- [7] Deschamps, J. (2023). *Computación cuántica: circuitos y algoritmos*. Barcelona: Marcombo, Alfaomega.
- [8] Bonillo, V. (2013). *Principios fundamentales de computación cuántica*. Texto de Apoyo, Universidad de A Coruña, Departamento de Computación, Facultad de Informática. Universidad de La Coruña. <https://cateinf.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/05/principios-fundamentales-de-computaci3b3n-cu3a1ntica.pdf>
- [9] Peralta, P. J. S., & Sáenz, A. L. S. (2001). Computación Cuántica. Una revolución en el tratamiento de la información. *Revista española de física*, 15(3), 1.
- [10] Vázquez, J. M. (2013). *Arquitectura y tecnología de computadores*. Universidad de Sevilla.

## A temporal approach to urban crime forecasting using recurrent neural networks

Juan Pablo Perez Leal<sup>1</sup> , Andrés Sebastián Ríos Gutiérrez<sup>2,3</sup> , David Romo-Bucheli<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Escuela Ingeniería de Sistemas e informática, Facultad de ingenierías fisicomecánicas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

<sup>2</sup>Departamento de Estadística, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

<sup>3</sup>Escuela de Matemáticas, Universidad Industrial de Santander

\*Autor para correspondencia/Corresponding author: [juanpabloperezleal@gmail.com](mailto:juanpabloperezleal@gmail.com)

## Un enfoque temporal para la predicción del crimen urbano usando redes neuronales recurrentes

### Abstract

This study investigates the use of Recurrent Neural Networks (RNNs) and Long Short-Term Memory (LSTM) networks to predict crime patterns in Bucaramanga, Colombia. A temporal approach is presented, which starts by splitting the city into 17 communes. Using a dataset of robbery incidents from 2016 to January 2023, we developed individual time series models for each commune. Then, we used the Root Mean Squared Error (RMSE) as the evaluation metric in these regression tasks. The LSTM models consistently outperformed both the RNN and ARIMA models, a classical methodology for time series prediction, achieving lower RMSE scores. The LSTM model yielded an average RMSE of 2.875 (with a standard deviation of 1.657), which is considerably lower than that obtained by the RNN model 3.101 (1.82) and the ARIMA model 3.428 (2.57). These results show that LSTM better captures the complex temporal dependencies in the data. Future work should explore hybrid models and the incorporation of additional data sources to enhance predictive accuracy further.

**Keywords:** Crime prediction, Neural Networks, Long Short-Term Memory (LSTM), Recurrent Neural Networks

### Resumen

Este estudio investiga el uso de Redes Neuronales Recurrentes (RNN) y redes de Gran Memoria a Corto Plazo (LSTM) para predecir patrones de criminalidad en Bucaramanga, Colombia. Se presenta un enfoque temporal que comienza dividiendo la ciudad en 17 comunas. Utilizando un conjunto de datos de incidentes de robos desde 2016 hasta enero de 2023, se desarrollaron modelos de series de tiempo individuales para cada comuna. Posteriormente, se empleó el Error Cuadrático Medio (RMSE) como métrica de evaluación en estas tareas de regresión. Los modelos LSTM superaron de manera consistente tanto a los modelos RNN como a los modelos ARIMA, una metodología clásica para la predicción de series temporales, logrando menores puntajes de RMSE. El modelo LSTM obtuvo un RMSE promedio de 2.875 (con una desviación estándar de 1.657), considerablemente inferior al obtenido por el modelo RNN, con 3.101 (1.82), y el modelo ARIMA, con 3.428 (2.57). Estos resultados demuestran que LSTM captura mejor



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Dennis Cazar

Recibido /  
Received:  
29/11/2024

Aceptado /  
Accepted:  
09/12/2024

Publicado en línea /  
Published online:  
12/05/2025



las complejas dependencias temporales en los datos. Trabajos futuros deberían explorar modelos híbridos y la incorporación de fuentes de datos adicionales para mejorar aún más la precisión predictiva.

**Palabras clave:** Predicción de crímenes, redes neuronales, redes LSTM, Redes Neuronales Recurrentes.

---

## INTRODUCTION

Crime prediction is a critical area of study for urban planning and public safety. The ability to anticipate criminal activities enables authorities to allocate scarce resources more effectively, plan preventive measures, and enhance community safety. Traditional methods of crime prediction have often relied on statistical models and historical data analysis [1]. Some of them are related to stational ARIMA models [2, 3], and others to GARCH models [4]. However, with the advent of advanced computational techniques, there is a growing interest in leveraging machine learning algorithms to improve the accuracy and reliability of these predictions. In addition, the crime data in Bucaramanga is a large volume database as may be seen in [5], and therefore it is difficult to get a good fit by using parametric time series models [6].

In recent years, Recurrent Neural Networks (RNNs) and Long Short-Term Memory networks (LSTMs), have shown significant promise in modeling time series data due to their ability to capture temporal dependencies and patterns [7, 8, 9]. RNNs, with their recurrent connections, are designed to recognize sequences and trends over time, making them suitable for analyzing temporal data. LSTMs, an extension of RNNs, address the limitations of traditional RNNs by incorporating memory cells that can store information for long periods by overcoming the issue of vanishing gradients and enabling the network to retain long-term dependencies [10].

This paper focuses on the application of RNNs and LSTMs to predict crime patterns in the city of Bucaramanga. We aim to develop models that can identify and predict the temporal trends in crime occurrences with higher accuracy. The study will explore the effectiveness of these models in capturing the intricate patterns of criminal activities, considering various temporal factors such as time of day, day of the week, and seasonal variations.

## RELATED WORKS

Predicting crime in cities has become a critical area of research for law enforcement and public safety agencies. By analyzing historical crime data, researchers can identify patterns and develop tools to anticipate future occurrences. Several existing research approaches are based on various machine learning for predicting crime. For instance, in [11], the authors utilize Chicago's public crime dataset for crime trend prediction based on a LSTM model. It also incorporates POI (Point of Interest) information data and employs a convolutional model to analyze and compare the time series distribution, spatial distribution, and prediction accuracy of various algorithm models. The experimental results demonstrate a



hit rate of 20.11% for different experiments using the LSTM algorithm. Another example is applied in Atlanta, which is one of the cities with high crime rates in the United States. In [12], the authors show that crime events exhibit spatial aggregation and temporal dependence, indicating that criminal incidents are predictable. In the mentioned paper, crime data from Atlanta, spanning 2009 to 2016, is used to identify spatio-temporal distribution features and create statistical visualizations. Forecast of daily crime occurrences is obtained via a LSTM model. The study further explores the impact of varying spatio-temporal scales on prediction accuracy. When using an input time series length of 50 days and a spatial cell size of 0.05 degrees, the correlation coefficient (R value) between predicted and observed crime data exceeds 0.87. Finally, in [13] a spatio-temporal approach is applied to model monthly robberies in Buenos Aires (Argentina). The main objective of the study is to implement predictive models to associate specific corners and times with the occurrence of crimes, based on monthly robbery records in Buenos Aires from 2017 to 2020. Initially, time series models using only historical crime counts are employed to predict criminal incidents at each street corner. Additionally, predictions include covariates related to the surrounding environment and weather conditions, transforming the problem into a spatio-temporal study. The study shows that crime, being a human activity, does not follow random behavior but rather social patterns influenced by time, weather, and geographical zones; in some cases, it shows an impact in the model of more than 13% for some features [13].

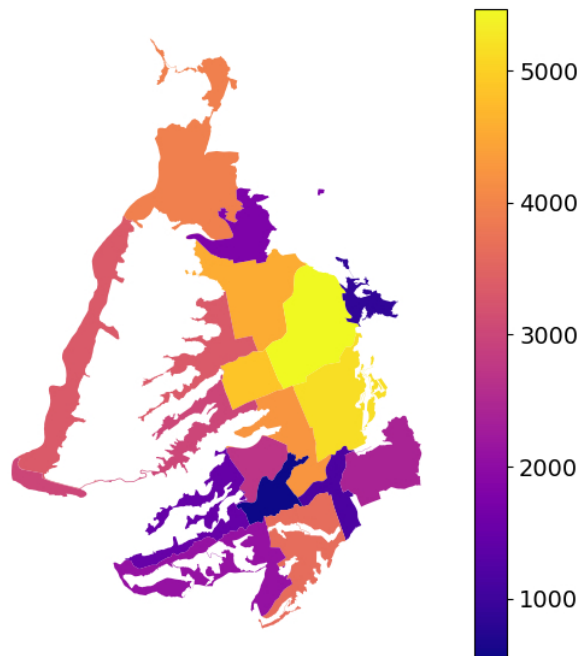
## MATERIALS

Bucaramanga is the capital of the department of Santander, Colombia. It is located on a plateau at 960 meters above sea level, with a population of approximately 600,000. Nestled in the eastern Andes Mountains of Colombia, Bucaramanga is characterized by its undulating topography and dense urbanization. The city extends over a series of hills and valleys, resulting in variations in accessibility and visibility across different areas [14]. Administratively, Bucaramanga is divided into 17 communes, each further subdivided into neighborhoods. Leveraging the big sizes and geographical locations of these communes, we get a framework to identify patterns and trends in crime rates. The dataset used in this study encompasses robbery incidents recorded from 2016 to January 2023. This data was collected by Bucaramanga's city hall, in collaboration with the municipal police, and is publicly available on the Datos Abiertos platform [5]. The collected data was grouped in weeks of the year instead of daily, resulting in the count of robberies for each commune. The period associated with the training data spanned from January 1, 2016, to September 12, 2022. A total of 17 time series were obtained, one for each of the communes. Test data for each commune was also extracted and is associated with the period spanning from September 13, 2022, to November 20, 2022.

Each record in the dataset includes the date of the robbery and the specific commune in which it occurred.

This dataset allows for the creation of a time series capturing the frequency of robbery incidents within each commune of Bucaramanga. Given the nature of the problem, it is expected that there will be days with zero reported incidents in some communes. This variability provides an opportunity to explore temporal patterns and anomalies in criminal activity across different areas of the city.

The collected data was grouped in weeks of the year instead of daily. The period associated with the training data spanned from January 1, 2016, to September 12, 2022. The models were trained for each commune independently, allowing them to learn the underlying patterns and trends specific to each commune in Bucaramanga. The test data is associated with the period spanning from September 13, 2022, to November 20, 2022. In Figure 1, a heatmap of Bucaramanga displaying the total count of robberies during the training period is shown. The crime distribution shows remarkable differences across the different communes in Bucaramanga.



**FIGURE 1.** Map of Bucaramanga displaying the spatial distribution and count of robbery incidents from January 2016 to November 2022. Own elaboration

## METHODOLOGY

In this work, we compared several methodologies for crime prediction, utilizing an independent temporal approach for each of the communes of Bucaramanga. Our purpose is to evaluate the effectiveness of different time series models in forecasting crime patterns. These are the different models that are going to be employed in this study.

**ARIMA:** Among the most commonly used tools for time series forecasting is the ARIMA model (Autoregressive Integrated Moving Average). The ARIMA model is valuable in situations where the data exhibits autocorrelation, that is, correlation between



past random variables and the present time random variable. Additionally, it can handle time series that are non-stationary, i.e., those that show trends or systematic variations over time [15]. It is important to note that the ARIMA model is a dynamic time series model, meaning that future estimates are explained by past data and not by independent variables [16, 17]. The ARIMA model can be defined as a composition of three main components: Autoregression (AR), Integration (I), and Moving Average (MA). Autoregression (AR) refers to the linear dependency of a current observation on past observations. In an AR model, the dependent variable is linearly regressed on its past values up to order  $p$ .

$$x_t = c + \phi_1 x_{t-1} + \phi_2 x_{t-2} + \dots + \phi_p x_{t-p} + \epsilon_t \quad (1)$$

where  $x_t$  is the dependent variable at time  $t$ ,  $c$  is a constant,  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$  are the autoregression parameters, and  $\epsilon_t$  is a random error term at time  $t$ . Generally, this follows a white noise (WN) process with variance  $\sigma^2$ , for all  $t \geq 0$ ,  $\epsilon_t \sim WN(0, \sigma^2)$  [17].

The Moving Average (MA) models the relationship between an observation and a residual error term generated by a moving average of errors in previous periods. In an MA model, the dependent variable is linearly regressed on past error terms up to order  $q$ . The relationship is mathematically defined as:

$$x_t = c + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \theta_2 \epsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q} + \epsilon_t, \epsilon_t \sim WN(0, \sigma^2), \quad (2)$$

where  $c$  is a constant,  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$  are the moving average parameters, and  $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_{t-q}$  are the error terms at previous times. Integration (I) refers to the process of making a time series stationary, i.e., removing trends or systematic patterns that may affect the prediction. This is achieved by differencing the time series until it becomes stationary. The order of differencing is denoted as  $d$ . This difference is recurrently defined as:

$$\Delta^d x_t = \Delta^{d-1} x_t - \Delta^{d-1} x_{t-1}, \Delta x_t = \Delta^1 x_t = x_t - x_{t-1} \text{ and } d = 2, 3, \dots \quad (3)$$

The ARIMA model combines these three components into a single framework and is denoted as ARIMA( $p, d, q$ ), where  $p$  is the order of autoregression,  $d$  is the order of differencing to get a stationary process (see [18]), and  $q$  is the order of moving average.

*Delay operator* is defined, for all  $u$  an integer number, as  $L^u x_t := x_{t-u}$  [18]. Based on this operator, the ARIMA( $p, d, q$ ) model is defined by:

$$\Phi_p(L)(1-L)^d x_t = c + \Theta_q(L)\epsilon_t \text{ with } \epsilon_t \sim WN(0, \sigma^2), \quad (4)$$

where  $\Phi_p(L), \Theta_q(L)$  are polynomials, respectively called the autoregressive polynomial and the moving average polynomial. In consequence,  $d$  represents the order of the differences required for the stochastic process  $\Phi_p(L)x_t = c + \Theta_q(L)\epsilon_t$  to be stationary.

**RNN Model:** Recurrent neural networks (RNNs) are designed to recognize patterns in sequences of data, making them well-suited for tasks involving time series analysis. Unlike traditional feedforward neural networks, RNNs have connections that form directed cycles, enabling them to maintain a memory of previous inputs [19].



The core of an RNN is the recurrent cell, which processes the input sequence one step at a time while maintaining a hidden state that evolves over time. We can do a mathematical formulation of this for an input sequence  $x = (x_1, x_2, \dots, x_t)$  where  $x_t$  represents the input at time step  $t$ . In our case,  $x_t$  would be the number of incidents at date  $t$  [20].

There is a hidden state  $h_t$  at time step  $t$  that is computed using the current input  $x_t$  and the previous hidden state  $h_{t-1}$ :

$$h_t = \sigma(W_{hx}x_t + W_{hh}h_{t-1} + b_h) \quad (5)$$

where  $W_{hx}$  is the weight matrix connecting the input to the hidden state,  $W_{hh}$  is the weight matrix connecting the hidden state to itself from the previous time step,  $b_h$  is the bias vector, and  $\sigma$  is a nonlinear activation function, typically a hyperbolic tangent or a ReLU function [21]. The output  $\hat{y}_t$  at time step  $t$  is computed by using the current hidden state  $h_t$ :

$$t = g(W_{hy}h_t + b_y) \quad (6)$$

where  $W_{hy}$  is the weight matrix connecting the hidden state to the output,  $b_y$  is the bias vector, and  $g$  is typically a linear or softmax function depending on the task. In our case,  $g$  is a linear function as we are dealing with regression. The RNN model learns to adjust the weights  $W_{hx}$ ,  $W_{hh}$ , and  $W_{hy}$ , as well as the biases  $b_h$  and  $b_y$ , by minimizing a loss function over the training data. For time series prediction, a common choice is the mean squared error (MSE).

In the context of this study, we employ RNNs to predict crime patterns based on a time series dataset. Each time series contains two columns: one for the number of robbery incidents and the other for the corresponding date. The same process is applied separately for each of the 17 communes in Bucaramanga, resulting in 17 distinct models, each tailored to the specific crime dynamics of its respective commune.

**LSTM Model:** LSTM networks are a type of RNN that address the limitations of traditional RNNs, particularly the issue of vanishing and exploding gradients. LSTMs introduce a more complex unit structure compared to traditional RNNs, featuring memory cells that can store information for extended periods. The key components of an LSTM cell include the cell state ( $c_t$ ) and three types of gates: input gate, forget gate, and output gate. These gates regulate the flow of information into, out of, and within the cell [22].

In this context, given the number of incidents on date  $t$  for an input sequence  $x = (x_1, x_2, \dots, x_t)$ , the LSTM network processes this information in a structured manner.

The forget gate determines what portion of the previous cell state ( $c_{t-1}$ ) should be retained based on the current input ( $x_t$ ) and the previous hidden state ( $h_{t-1}$ ):

$$f_t = \sigma(W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f) \quad (7)$$

where  $\sigma$  is the sigmoid function,  $W_f$  and  $U_f$  are weight matrices,  $h_{t-1}$  is the previous hidden state, and  $b_f$  is the bias vector.



The input gate controls the amount of new information added to the cell state. It produces an intermediate candidate cell state ( $\tilde{h}_t$ ) that is regulated by the input gate ( $i_t$ ):

$$i_t = \sigma(W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i) \quad \tilde{c}_t = \tanh(W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c) \quad (8)$$

where  $i_t$  is the input gate output,  $W_i$  is the weight matrix for the input  $x_t$ ,  $U_i$  is the weight matrix for the previous hidden state  $h_{t-1}$ ,  $b_i$  is the bias vector for the input gate,  $\tilde{c}_t$  is the candidate cell state,  $W_c$  is the weight matrix for the input  $x_t$  related to the candidate cell state,  $U_c$  is the weight matrix for the previous hidden state  $h_{t-1}$ , and  $b_c$  is the bias vector for the candidate cell state. The cell state is updated by combining the previous cell state and the candidate cell state:

$$c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot \tilde{c}_t \quad (9)$$

where  $\odot$  denotes the element-wise multiplication.

The output gate determines the output of the LSTM cell based on the up-dated cell state ( $c_t$ ) and the current input, producing the hidden state ( $h_t$ ):

$$o_t = \sigma(W_o x_t + U_o h_{t-1} + b_o) \quad (10)$$

$$h_t = o_t \odot \tanh(c_t)$$

where  $o_t$  is the output gate output and  $h_t$  is the hidden state at time step  $t$ . In this study, we employ LSTMs to predict crime patterns using time series data, where each time series consists of two columns: the number of robbery incidents and the corresponding date. This process is replicated for each of the 17 communes in Bucaramanga, resulting in 17 individual models tailored to the unique crime dynamics of each commune.

Each LSTM model is trained on the historical time series data of robbery incidents for a specific commune. The training process involves backpropagation through time (BPTT) to update the model parameters. Given the sparse nature of the data, with many days having zero incidents, the models must learn to identify underlying patterns and trends that contribute to the temporal dynamics of crime within each commune.

The tests were conducted using TensorFlow Keras in a Google Colab environment, utilizing Google cloud TPU v2 hardware. This setup provided high-performance computing for training deep learning models efficiently on large datasets.

**Metrics:** The performance of the planned models in predicting crime patterns is evaluated using the Root Mean Squared Error (RMSE). RMSE is a commonly used metric for regression tasks, and it is defined as follows:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (11)$$



where  $n$  is the number of observations,  $(\hat{y}_i)$  is the predicted value for the  $i$ -th observation, and  $y_i$  is the actual value for the  $i$ -th observation. Lower RMSE values indicate a better fit of the model to the data, as it implies that the differences between the predicted and actual values are smaller.

We also computed the SMAPE metric defined as:

$$SMAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|y_t - \hat{y}_t|}{\frac{|y_t| + |\hat{y}_t|}{2}} \quad (12)$$

where  $n$  corresponds to the total number of observations,  $t$  is the index of the observation,  $y_t$  is the actual value at time  $t$ , and  $\hat{y}_t$  is the predicted value at time  $t$ .

The SMAPE metric outputs a percentage value that quantifies the accuracy of a prediction model. The value ranges from 0% to 200%, where 0% indicates a perfect prediction with no error, meaning the predicted values match the actual values exactly. As the SMAPE value increases, it indicates a larger discrepancy between the predicted and actual values, with 200% representing the maximum possible error when one value is positive and the other is zero. A SMAPE close to 100% suggests that the model's predictions are, on average, as far from the actual values as they are close, implying poor predictive performance.

## EXPERIMENTAL SETUP AND RESULTS

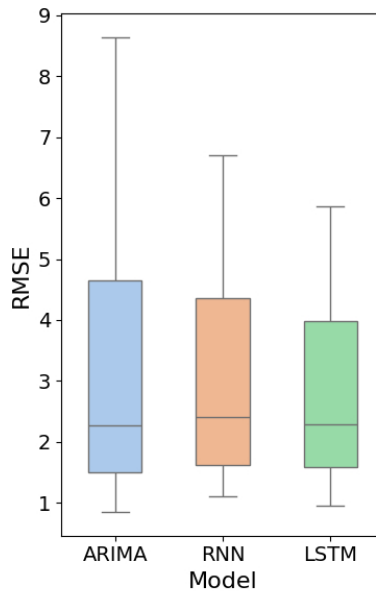
The RNN implementation in this study is based on the foundational work by [23]. This basic RNN model serves as a reference point, as it does not include the advanced gating mechanisms introduced in more modern architectures like LSTM and GRU. While both LSTM and GRU enhance the basic RNN architecture by incorporating gates that effectively manage memory and filter information, we chose to focus exclusively on LSTM as it is representative of this kind of RNN.

After training the models using data from each commune, the results of the previously mentioned models were compared. Figure 2 (left) shows a table of RMSE results for each commune.

The LSTM model demonstrates superior overall performance across all models evaluated in this study. It consistently achieves lower RMSE scores compared to the RNN and ARIMA models, indicating its effectiveness in capturing the complex temporal patterns in the crime data. However, it is noteworthy that the RNN model occasionally outperforms the LSTM in certain specific communes. In contrast, the ARIMA model yields higher RMSE scores, underscoring the limitations of a purely statistical, regressive approach for this type of problem.

**Table 1.** RMSE for each one of the models used. Best values are highlighted in bold.

Commune	ARIMA	RNN	LSTM
1	2.915	2.722	2.761
2	1.486	2.387	1.534
3	7.162	5.684	5.216
4	2.338	2.266	2.292
5	2.269	2.416	2.158
6	4.184	3.733	3.852
7	1.841	1.620	1.591
8	0.854	1.109	1.108
9	1.262	1.517	1.578
10	4.656	4.354	4.016
11	2.205	2.106	2.358
12	8.643	5.693	4.893
13	8.177	6.697	5.867
14	1.169	1.121	1.006
15	5.917	5.485	5.501
16	1.501	1.302	1.500
17	1.703	2.501	1.641
<b>Mean</b>	<b>3.428</b>	<b>3.101</b>	<b>2.875</b>
<b>St. dev.</b>	<b>2.570</b>	<b>1.820</b>	<b>1.657</b>



**FIGURE 2.** Boxplot comparison of RMSE for all the validated models. Own creation



Furthermore, the standard deviation of the RMSE scores reveals that the LSTM model not only provides more accurate predictions on average but also exhibits lower variability. This suggests a more stable and reliable predictive capability. Figure 2 and Table 1 offers a visual representation of the RMSE score distributions across the different models.

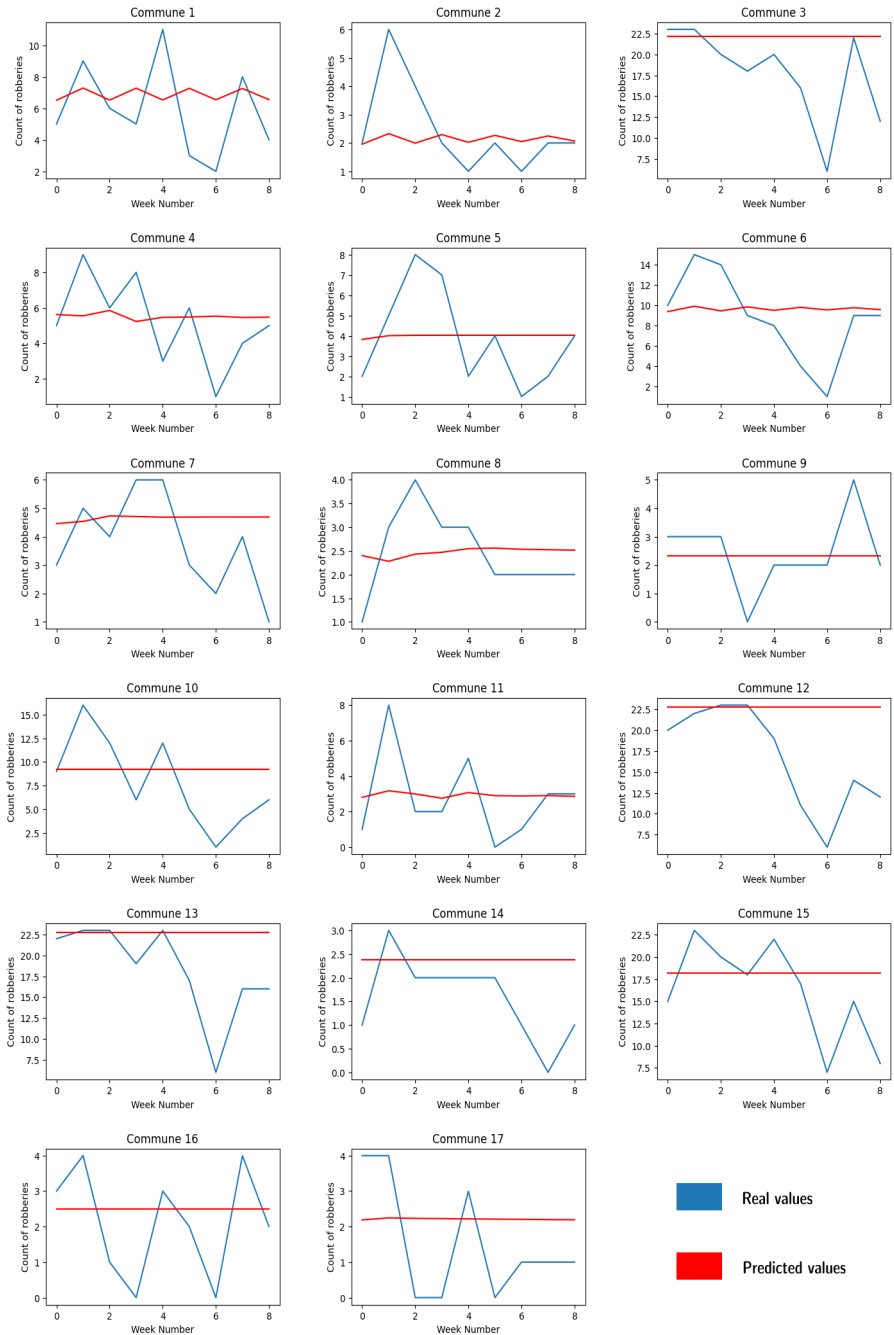
In addition to numerical evaluation, we can compare the performance of the models through visualizations of the time series predictions. Figures 3, 4, and 5 display the predicted values for ARIMA, RNN, and LSTM models alongside the actual data.

The graphical representation of the ARIMA model's predictions reveals a significant limitation: its inability to accurately predict spikes in the data. The ARIMA model tends to generate a single smooth approximation throughout the entire time series, failing to capture the abrupt changes and peaks that characterize real-world crime data. This indicates that the ARIMA model, being a purely statistical approach, lacks the flexibility needed to adapt to the complex and nonlinear patterns inherent in the crime time series.

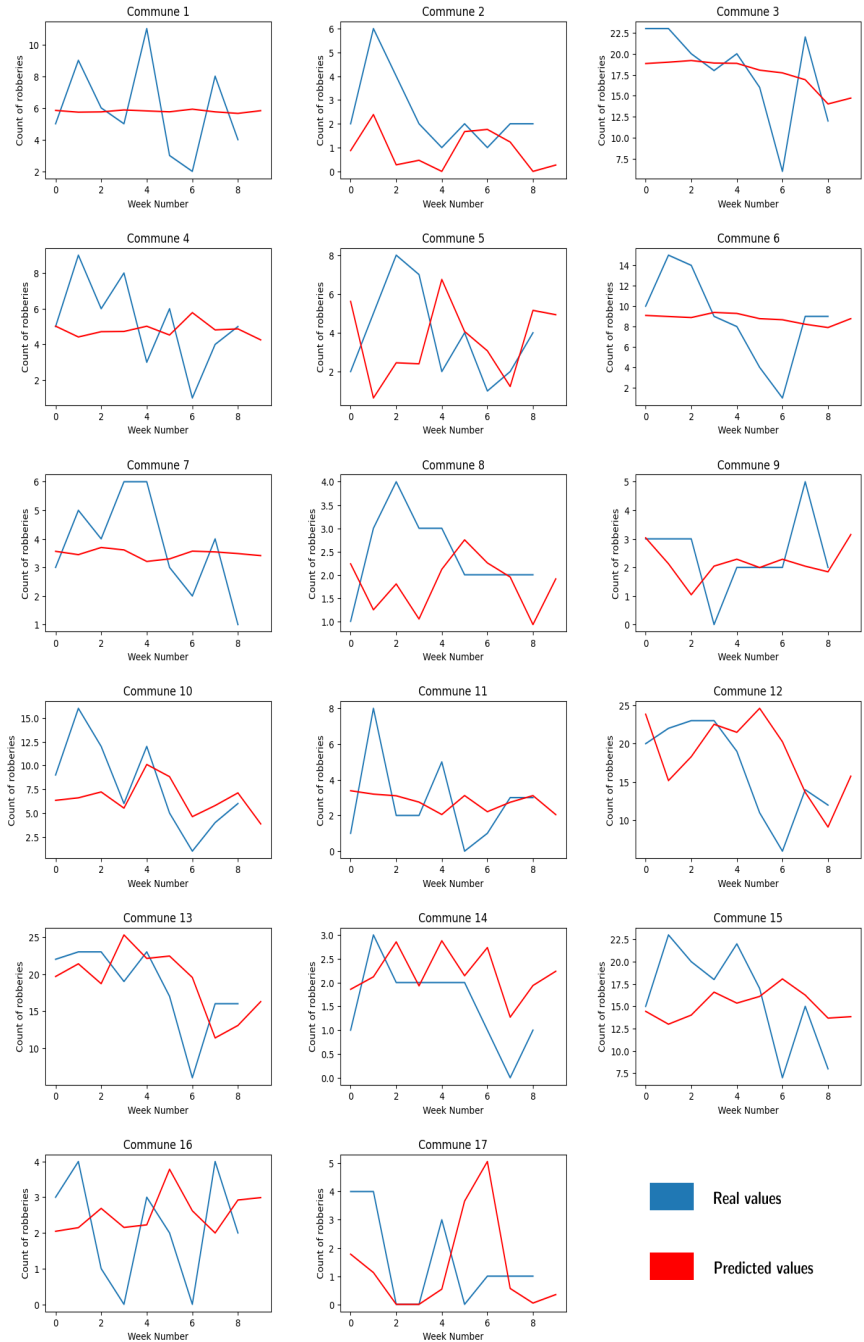
In contrast, the RNN and LSTM models exhibit a markedly improved capacity for approximating the real data. Both models demonstrate a better alignment with the observed trends and are more adept at predicting some of the spikes in the crime incidents. The RNN and LSTM models, leveraging their recurrent structures, can retain and utilize information from previous time steps, allowing them to capture both short-term fluctuations and long-term trends more effectively.

The RNN model tends to produce smoother predictions, often missing the sharp fluctuations in the real data. This smoothing effect results in a more generalized prediction that fails to capture the variability present in the actual crime data. The RNN model struggles to detect sudden spikes in robbery counts, leading to underestimations during periods of high activity, particularly noticeable in Communes 2, 5, and 12. While the RNN model aligns with the general direction of the trends in some communes, it consistently underperforms in accurately following the actual data patterns, particularly in areas with more volatile crime rates. On the other hand, the LSTM model provides a much closer fit to the actual data compared to the RNN. It captures the fluctuations and trends more accurately, indicating its ability to model the temporal dependencies more effectively. Unlike the RNN, the LSTM model is better at detecting and replicating spikes in crime data, as seen in Communes 3, 7, and 13. This suggests that the LSTM model is more responsive to changes in the crime patterns. The LSTM model demonstrates a superior ability to track the real data across all communes. It reduces the prediction error and better follows the actual robbery counts, making it a more reliable model for this type of prediction.

Based on the analysis of SMAPE scores the models across the communes, both models exhibit similar overall performance, with average SMAPE scores of 48.02 for ARIMA and 48.59 for LSTM. However, closer inspection reveals that LSTM outperforms ARIMA in certain contexts. Specifically, in communes 1, 3, 7 and 12, the LSTM model shows superior predictive accuracy. These areas tend to have more stable or predictable crime patterns, or they exhibit higher volumes of crime, allowing LSTM's ability to capture long-term dependencies and handle complex temporal trends to shine. On the other hand, in communes where crime patterns have low variation or are closer to the mean, ARIMA tends to perform better, likely due to its strength in modeling simpler, more linear time series data.



**FIGURE 3.** Time series of the predicted values for the ARIMA model. Own creation



**FIGURE 4.** Time series of the predicted values for the RNN model. Own creation

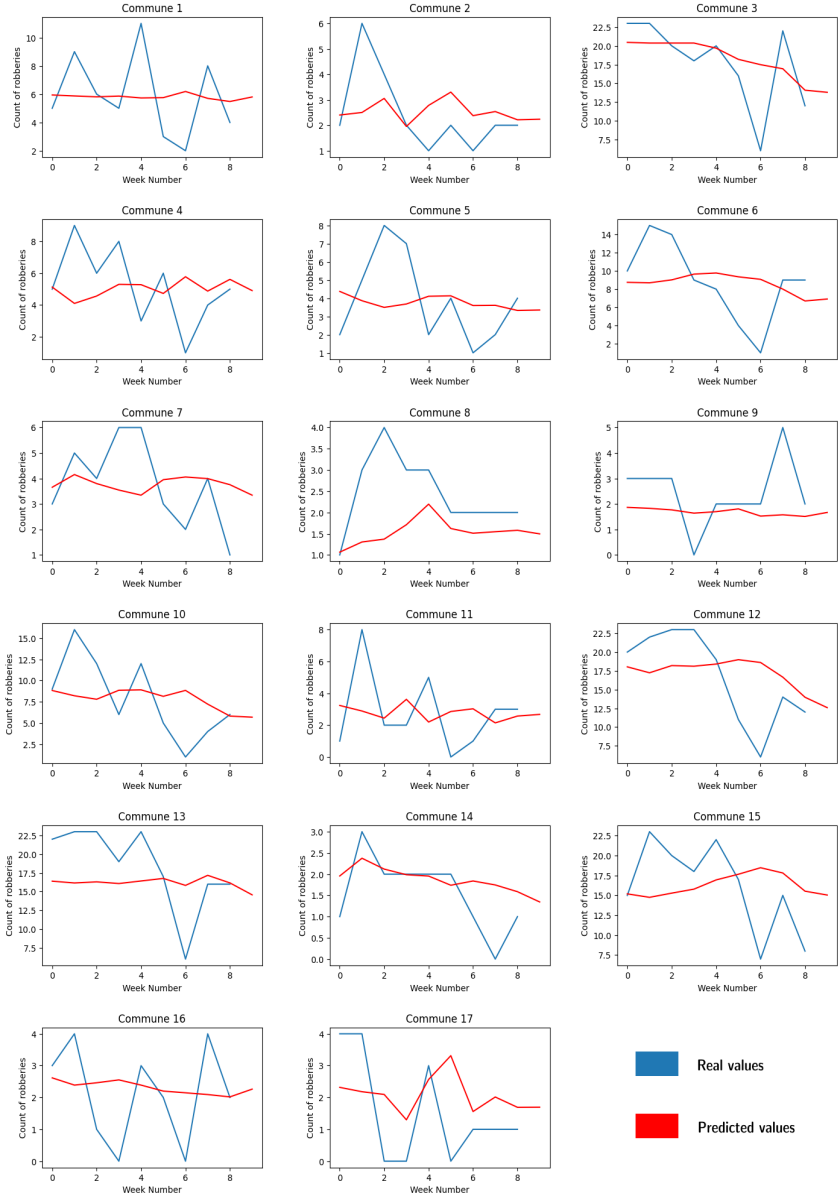


FIGURE 5. Time series of the predicted values for the LSTM model. Own creation

## CONCLUSION

In this study, we explored the potential of utilizing solely temporal data to understand and predict crime patterns in a Latin American urban context, specifically Bucaramanga.



This approach underscores a significant advancement in the field of urban crime analysis. By focusing on temporal dynamics, we demonstrated that effective predictions could still be achieved without the inclusion of spatial data, which is often considered crucial in such analyses. This finding is particularly valuable for regions where spatial data may be incomplete or unavailable. Our results highlight the robustness of temporal models, such as LSTM, in extracting meaningful patterns from time-series data alone, offering a promising avenue for enhancing public security strategies in similar urban settings. Integrating High-Performance Computing (HPC) enables us to leverage real-time data for scalable AI predictions, enhancing our capacity to handle extensive datasets efficiently and effectively in dynamic environments.

The results demonstrated that LSTM models consistently outperform both RNN and ARIMA models in predicting crime incidents across all 17 communes in our case study.

Visual comparison through time series plots further elucidated the strengths and weaknesses of each model. The ARIMA model's predictions were notably smooth and failed to capture the abrupt changes in crime incidents, indicating a significant shortfall in its predictive capability. In contrast, both the RNN and LSTM models exhibited a better fit to the actual data, more accurately reflecting the observed trends and spikes.

While the study demonstrates the effectiveness of LSTMs in crime prediction, there are limitations that warrant further investigation. Incorporating more features, such as socioeconomic indicators, weather conditions, and public events, could potentially improve the model's predictive power. Future work should explore the integration of spatial data, other data sources, and the development of hybrid models to capitalize on the strengths of different neural network architectures.

## **AUTHORS' CONTRIBUTIONS**

Writing: Juan Pablo Perez Leal, Andrés Sebastián Ríos Gutiérrez, David Romo-Bucheli  
Visualization: Juan Pablo Perez Leal  
Conceptualization and Supervision: Andrés Sebastián Ríos Gutiérrez, David Romo-Bucheli

## **CONFLICT OF INTEREST**

The authors have no competing interests to declare that are relevant to the content of this article.

## **ACKNOWLEDGEMENT**

The authors would like to thank the Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) of the Universidad Industrial de Santander for supporting this research work through the project "Adaptación de Dominio para Modelos de Aprendizaje Automático en Patología Digital con Imágenes Histológicas de Baja Magnificación," with code SIMIE 3951.

## REFERENCES

- [1] Thomas, A., & Sobhana, N. (2022). A survey on crime analysis and prediction. *Materials Today: Proceedings*, 58, 310–315. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.170>
- [2] Ghani, U., Toth, P., & David, F. (2023). Predictive choropleth maps using ARIMA time series forecasting for crime rates in Visegrád group countries. *Sustainability*, 15(10), 8088. <https://doi.org/10.3390/su15108088>
- [3] Noor, T. H., Almars, A. M., Alwateer, M., Almaliki, M., Gad, I., & Atlam, E. S. (2022). SARIMA: A seasonal autoregressive integrated moving average model for crime analysis in Saudi Arabia. *Electronics*, 11(23), 3986. <https://doi.org/10.3390/electronics11233986>
- [4] Escudero, I., Angulo, J. M., & Mateu, J. (2022). A spatially correlated model with generalized autoregressive conditionally heteroskedastic structure for counts of crimes. *Entropy*, 24(7), 892. <https://doi.org/10.3390/e24070892>
- [5] *Delitos ocurridos en el Municipio de Bucaramanga | Datos Abiertos Colombia*. (2018, October 22). Retrieved October 20, 2023 from [https://www.datos.gov.co/Seguridad-y-Defensa/Delitos-ocurridos-en-el-Municipio-de-Bucaramanga/75fz-q98y/about\\_data](https://www.datos.gov.co/Seguridad-y-Defensa/Delitos-ocurridos-en-el-Municipio-de-Bucaramanga/75fz-q98y/about_data)
- [6] Fan, J., & Yao, Q. (2008). *Nonlinear time series: Nonparametric and parametric methods*. Springer Science & Business Media.
- [7] Al-Selwi, S. M., Hassan, M. F., Abdulkadir, S. J., Muneer, A., Sumiea, E. H., Alqushaibi, A., & Ragab, M. G. (2024). RNN-LSTM: From applications to modeling techniques and beyond—Systematic review. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 36(5), 102068. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2024.102068>
- [8] Wang, Q., Guo, Y., Yu, L., & Li, P. (2017). Earthquake prediction based on spatio-temporal data mining: An LSTM network approach. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 8(1), 148–158. <https://doi.org/10.1109/TETC.2017.2699169>
- [9] Zhou, S. K., Rueckert, D., & Fichtinger, G. (Eds.). (2019). *Handbook of medical image computing and computer assisted intervention*. Academic Press.
- [10] Zhang, J., Zeng, Y., & Starly, B. (2021). Recurrent neural networks with long term temporal dependencies in machine tool wear diagnosis and prognosis. *SN Applied Sciences*, 3(4), 442. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04427-5>
- [11] Jiang, N., Miao, K., Chai, Y., Lu, D., & Wu, J. (2023). Spatio-temporal prediction of crime based on data mining and LSTM network. *2023 IEEE 6th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, 6, 672–676. <https://doi.org/10.1109/ITNEC56291.2023.10081985>
- [12] Wang, S., & Yuan, K. (2019). Spatiotemporal analysis and prediction of crime events in Atlanta using deep learning. *2019 IEEE 4th International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC)*, 346–350. <http://dx.doi.org/10.1109/ICIVC47709.2019.8981090>
- [13] Zambrano, R. (2022). Un enfoque Espacio Temporal para la predicción de delitos en la ciudad de Buenos Aires. *Revista de Investigación de Modelos Matemáticos Aplicados a la Gestión y a la Economía*, 2, 38–62. [http://www.economicas.uba.ar/institutos\\_y centros/revista-modelos-matematicos/](http://www.economicas.uba.ar/institutos_y centros/revista-modelos-matematicos/)
- [14] *Alcaldía de Bucaramanga: Plan Integral de Seguridad y Convivencia para una Bucaramanga Segura 2020-2023*. (2020). <https://www.bomberosdebucaramanga.gov.co/contenido/wp-content/uploads/2023/04/PISCC-Bucaramanga-2020-2023.pdf>
- [15] Uma Devi, B., Sundar, D., & Alli, P. (2013). An effective time series analysis for stock trend prediction using ARIMA model for nifty midcap-50. *International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process*, 3(1), 65-78. <http://dx.doi.org/10.5121/ijdkp.2013.3106>
- [16] Brockwell, P. J., & Davis, R. A. (1991). *Time Series: Theory and Methods*. Springer Science & Business Media.
- [17] Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and Practice*. OTexts.
- [18] Resnick, S. I. (2013). *Adventures in Stochastic Processes*. Springer Science & Business Media.
- [19] Peña, D. (2005). *Análisis de Series Temporales*. Alianza Editorial.
- [20] Lipton, Z. C., Berkowitz, J., & Elkan, C. (2015). A Critical Review of Recurrent Neural Networks for Sequence Learning. <https://arxiv.org/abs/1506.00019>



- [21] Li, J., Xu, H., Deng, J., & Sun, X. (2016). Hyperbolic linear units for deep convolutional neural networks. 2016 *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 353-359. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2016.7727220>
- [22] Gers, F., Schmidhuber, J., & Cummins, F. (1999). Learning to forget: Continual prediction with LSTM. 1999 *Ninth International Conference on Artificial Neural Networks ICANN99*, 2, 850–855. <https://doi.org/10.1049/cp:19991218>
- [23] Elman, J. L. (1990). Finding structure in time. *Cognitive Science*, 14(2), 179–211. [https://doi.org/10.1207/s15516709cog1402\\_1](https://doi.org/10.1207/s15516709cog1402_1)