ISSN: 2600-5573

Enero 2026

Volumen 8

Nº 1

IDEAS JOURNAL

Innovation & Development in Engineering and Applied Science

https://doi.org/10.53358/ideas.v8i1

latindex

Crossref

Google Scholar

RERCIE
Red de Editores y Revistas Científicas Ecuatorianas

MIAR
Matriz de Información para el Análisis de Revistas

ORCID

IDEAS

Innovation & Development in Engineering and Applied Science

Journal homepage: https://revistasojs.utn.edu.ec/index.php/ideas

EQUIPO EDITORIAL

Daisy E. Imbaquingo, PhD.
DIRECTOR GENERAL
(Universidad Técnica del Norte - Ecuador)
email: deimbaquingo@utn.edu.ec

Marco Ciaccia, PhD.
EDITOR GENERAL
(Universidad Técnica del Norte - Ecuador)
email: mciaccia@utn.edu.ec

Brizeida Gámez, PhD.
EDITOR ACADÉMICO
(Universidad Técnica del Norte - Ecuador)
email: bngamez@utn.edu.ec

Miguel Vivert, PhD.
EDITOR ACADÉMICO
(Universidad Técnica del Norte - Ecuador)
email: mevivert@utn.edu.ec

Ana Cabrera, PhD.
EDITOR ACADÉMICO EXTERNO
(Universidad Politécnica Nacional) email:
ana.cabrera@epn.edu.ec

Fernando Ramírez, PhD.
EDITOR DE SECCIÓN
(Universidad Técnica del Norte - Ecuador)
email: framirez@utn.edu.ec

Cathy Guevara, PhD.
EDITOR DE SECCIÓN
(Universidad Técnica del Norte - Ecuador)
email: cguevara@utn.edu.ec

Fausto Salazar, PhD.
EDITOR DE SECCIÓN
(Universidad Técnica del Norte - Ecuador)
email: fsalazar@utn.edu.ec

David Ojeda, PhD.
EDITOR DE SECCIÓN
(Universidad Técnica del Norte - Ecuador)
email: daojeda@utn.edu.ec

IDEAS

Innovation & Development in Engineering and Applied Science

Journal homepage: https://revistasojs.utn.edu.ec/index.php/ideas

Lucía Vásquez, PhD.
EDITOR DE SECCIÓN
(Universidad Técnica del Norte - Ecuador)
email: ldvasquez@utn.edu.ec

Lissette Revelo, MSc.
EDITOR DE SECCIÓN
(Universidad Técnica del Norte - Ecuador)
email: lgreveloc@utn.edu.ec

Vladimir Bonilla, PhD.
EDITOR ASOCIADO
(Universidad Yachay Tech - Ecuador)
email: fbonilla@yachaytech.edu.ec

Thalía San Antonio, PhD.
EDITOR ASOCIADO
(Universidad Técnica del Ambato - Ecuador)
email: t.sanantonio@uta.edu.ec

Mario Ron, PhD.
EDITOR ASOCIADO
(Universidad de las Fuerzas Armadas - Ecuador)
email: mbron@espe.edu.ec

Laura Guerra, PhD.
EDITOR ASOCIADO
(PUCE Sede Ibarra - Ecuador)
email: lrguerra@pucesi.edu.ec

Wilson Guachamín, PhD.
EDITOR ASOCIADO
(Escuela Politécnica Nacional - Ecuador)
email: wilson.guachamin@epn.edu.ec

Beatriz Pernía, Dra.
EDITOR ASOCIADO
(Universidad de Guayaquil - Ecuador)
email: beatriz.pernias@ug.edu.ec

Nacarí Marín, PhD.
EDITOR ASOCIADO
(Universidad Tecnológica de Panamá - Panamá)
email: nacari.marin@utp.ac.pa

Víctor Hugo Saquicela, PhD.
EDITOR ASOCIADO
(Universidad de Cuenca - Ecuador)
email: victor.saquicela@ucuenca.edu.ec

Belkys Amador, PhD.
COMITÉ CIENTÍFICO INTERNACIONAL
(Universidad Nacional de la Táchira - Venezuela)
email: bamador@unet.edu.ve

Vannessa Duarte, PhD.
COMITÉ CIENTÍFICO INTERNACIONAL
(Universidad Católica del Norte - Chile)
email: vannessa.duarte@unc.cl

IDEAS

Innovation & Development in Engineering and Applied Science

Journal homepage: https://revistasojs.utn.edu.ec/index.php/ideas

Laura Sáenz, PhD.
COMITÉ CIENTÍFICO INTERNACIONAL
(Universidad José Antonio Páez - Venezuela)
email: decanatoingenieria@ujap.edu.ve

Luis Garza, PhD.
COMITÉ CIENTÍFICO INTERNACIONAL
(Universidad de Colima - México)
email: luis_garza1@ucol.mx

Lilibeth Zambrano, PhD.
COMITÉ CIENTÍFICO INTERNACIONAL
(South East Technological University - Irlanda)
email: zambranol@itcarlow.ie

Silvia Arciniega, Dra.
SECRETARIA Y CORRECTORA DE ESTILO
(Universidad Técnica del Norte - Ecuador)
email: srarciniega@utn.edu.ec

Leonardo Ibujes, Ing.
EDITOR TÉCNICO
(Universidad Técnica del Norte - Ecuador)
email: ideas@utn.edu.ec

Gabriela Obando
EDITOR TÉCNICO
(Universidad Técnica del Norte - Ecuador)
email: rgobandon@utn.edu.ec

David Cargua
MAQUETADOR
(Universidad Técnica del Norte - Ecuador)
email: pdcarguag@utn.edu.ec

ISSN: **2600-5573**
ORCID: **https://orcid.org/0009-0009-2557-9251**

IDEAS

Innovation & Development in Engineering and Applied Science

Journal homepage: https://revistasojs.utn.edu.ec/index.php/ideas

EDITORIAL:

La revista IDEAS, en su número 1 del volumen 8 titulado "Convergencia Digital y Productiva: Ingeniería para el Desarrollo Local", reúne investigaciones que convergen en torno a tecnologías digitales, optimización de procesos productivos y soluciones aplicadas a retos regionales y ambientales. Los trabajos aquí publicados muestran cómo la ingeniería y las ciencias aplicadas se articulan con metodologías de datos, automatización y diseño centrado en el usuario para generar impacto en pequeñas empresas, servicios públicos y gestión ambiental.

En el área de transformación digital en PYMES, Palacios y Trejo presentan una aplicación móvil integrada con facturación electrónica que, mediante el marco ágil Mobile D y tecnologías multiplataforma (Flutter y Firebase), reduce significativamente los tiempos de transacción y mejora la experiencia de compra en un comercio minorista local.

En cuanto a redes y comunicaciones, Meneses et al. comparan SD WAN y MPLS a través de escenarios de simulación con cargas controladas y visualización en Grafana, ofreciendo criterios técnicos sobre latencia, jitter, ancho de banda y pérdida de paquetes para orientar decisiones en infraestructuras empresariales.

Revelo, usando teledetección aplicada a la conservación ambiental, explora modelos de distribución de especies que integran aprendizaje automático y datos geoespaciales, destacando su utilidad para identificar áreas críticas y apoyar estrategias de conservación y manejo de ecosistemas.

En el campo de Big Data e infraestructura, Caicedo revisa arquitecturas y herramientas como Hadoop, Spark y bases de datos NoSQL, y discute patrones Lambda y Kappa, retos de seguridad y tendencias emergentes como edge computing e integración de IA en procesos de ingesta y análisis.

Respecto a seguridad y arquitectura de APIs, Rea propone el diseño e implementación de un API Gateway ligero en Java como alternativa centralizada al uso de tokens JWT, describiendo requisitos funcionales, arquitectura y la aplicación de metodologías DSR y Scrum para su desarrollo e integración segura con APIs REST.

En la esfera de la automatización agrícola, Buenaño ofrece una revisión sistemática sobre control automático en la producción bananera, resaltando el papel de PLC y SCADA en la mejora de eficiencia, estabilidad y sostenibilidad de procesos productivos del sector.

IDEAS

Innovation & Development in Engineering and Applied Science

Journal homepage: https://revistasojs.utn.edu.ec/index.php/ideas

Para la predicción de demanda en servicios de transporte, Sánchez y Chamorro comparan ARIMA, Prophet y Random Forest en el contexto de un servicio de radio taxi, encontrando que ARIMA presenta mejores métricas de error (MAE, MSE, RMSE) y mayor consistencia en las predicciones analizadas.

En lo relativo al diseño y calidad del transporte público, Garzón plantea el desarrollo de un modelo estadístico para interpretar variables de confort, accesibilidad, seguridad y limpieza en paradas de autobús, con el objetivo de generar recomendaciones basadas en datos para mejorar la experiencia de los usuarios y la inclusión.

Finalmente, en el ámbito de la distribución de planta y tecnologías emergentes, Valenzuela y colaboradores revisan la integración de IoT, realidad virtual/aumentada e inteligencia artificial en la disposición de instalaciones, mostrando cómo estas tecnologías pueden aumentar la eficiencia operativa y facilitar la toma de decisiones en entornos industriales.

Los artículos reunidos en este número ofrecen un panorama interdisciplinario donde datos, automatización y diseño aplicado se combinan para resolver problemas concretos de la región. IDEAS Vol. 8 Nº 1 propone no solo soluciones técnicas, sino también marcos metodológicos replicables que fortalecen la vinculación entre academia, industria y comunidad. Agradecemos a los autores y revisores por su aporte y esperamos que estas investigaciones inspiren nuevas colaboraciones y aplicaciones que impulsen el desarrollo local con impacto sostenible.

Editor General

IDEAS

Innovation & Development in Engineering and Applied Science

Journal homepage: https://revistasojs.utn.edu.ec/index.php/ideas

Wildlife species distribution modeling with unmanned aircraft

Modelado de la distribución de especies de fauna silvestre mediante aeronaves no tripuladas

Marco Revelo[a–b], Luis A. Rivera[a–c], Cristian Revelo[c]

[a] Postgraduate Program in FISI, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

[b] Universidad de Investigación de Tecnología Experimental YACHAY, Urcuquí, Ecuador

[c] Laboratory of Mathematical Sciences, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Brazil

Enviado: 2024-12-02, Aceptado: 2025-09-23, Publicado: 2026-01-30

Autor de correspondencia:
Marco Revelo: marco.revelo@unmsm.edu.pe

DOI: 10.53358/ideas.v8i1.1177

KEYWORDS

Drones,
unmanned aerial vehicle (UAV),
resolution,
ecological reserve,
topography,
accuracy,
protected forest,
geospatial analysis,
wildlife monitoring,
distribution model.

ABSTRACT

The use of drones and open-source software in Species Distribution Models (SDMs) represents an innovative approach for the study of wildlife fauna. This article reviews the current state of the art regarding their integration, identifying trends, challenges, and opportunities.

The methodology followed the PRISMA guidelines and included a literature search in databases such as Scopus, Web of Science, and Google Scholar. Articles published within the last decade were selected if they addressed the use of drones in wildlife monitoring and the application of open-source tools in spatial data analysis.

The results show a significant increase in the use of drones to collect precise geospatial data, improving the identification of habitats and species distribution patterns. Tools such as QGIS, R, and MaxEnt enable data processing without licensing costs, promoting accessibility and scientific reproducibility.

However, challenges remain in terms of methodological standardization, integration of heterogeneous data sources, and limited detection capability for certain species. Variability in image quality and environmental conditions also affects the accuracy of results.

In conclusion, the combination of drones and open-source software offers clear benefits: it enhances efficiency, improves model accuracy, and reduces costs. Nevertheless, greater standardization and technical validation are required to optimize its application in ecology and conservation.

PALABRAS CLAVE

Drones,
unmanned aerial vehicle (UAV),
topografía,
resolución,
reserva ecológica,
bosque protegido,
análisis geoespacial,
seguimiento de la fauna silvestre,
precisión,
modelo de distribución.

RESUMEN

El uso de drones y software libre en Modelos de Distribución de Especies (MDE) representa una alternativa innovadora para el estudio de la fauna silvestre. Este artículo revisa el estado del arte sobre su integración, identificando tendencias, desafíos y oportunidades.

La metodología siguió las directrices PRISMA, con búsqueda en bases como Scopus, Web of Science y Google Scholar. Se seleccionaron artículos publicados en la última década que aborden el uso de drones en monitoreo faunístico y el empleo de herramientas libres en análisis espacial.

Los resultados muestran un aumento notable en el uso de drones y tyopografía para obtener datos geoespaciales precisos, lo que mejora la identificación de hábitats y patrones de distribución. Herramientas como QGIS, R y MaxEnt permiten procesar estos datos sin costos de licencia, fomentando la accesibilidad y reproducibilidad científica.

No obstante, persisten desafíos en la estandarización metodológica, fusión de datos heterogéneos y detección limitada de ciertas especies. La variabilidad en calidad de imágenes y condiciones ambientales también afecta los resultados.

En conclusión, la combinación de drones y software libre ofrece beneficios claros: mejora la eficiencia, aumenta la precisión de los modelos y reduce costos. Sin embargo, se requiere mayor estandarización y validación técnica para optimizar su aplicación en ecología y conservación.

1. Introduction

Species Distribution Models (SDMs) help to identify and protect areas rich in biodiversity and predict changes in species distribution due to factors such as climate conditions, habitat alteration by human influence or other invasive species. In general, forest ecosystems are exposed to a wide variety of environmental, social and economic pressures that challenge their sustainability on a planetary scale.

The biodiversity they harbor can respond in many ways to these pressures, generating variable and complex impacts. Therefore, it is necessary to anticipate such impacts and future challenges with appropriate, proactive and adaptive management [1]. In this context, the efforts of researchers try to conceive increasingly efficient SDMs, incorporating computer vision techniques oriented to the analysis and processing of images of natural environments, since the objective is precisely the conservation of species in their habitat, allowing the interpretation and prediction of species situations.

For example, a recent study [2] demonstrates how advanced AI algorithms, such as Maximum Entropy (MaxEnt) and Random Forest (RF), can integrate large environmental and biological datasets to clearly predict species distributions. Likewise, other recent studies have demonstrated the importance of predictive models for the conservation of species such as the mountain tapir [3]. The *Journal of the Royal Society Interface* introduced a distribution model for multiple species that operates on presence-only data, which is valuable for maximizing the use of global biodiversity databases such as GBIF [4].

On the other hand, there is the problem of obtaining satellite images, which usually involves considerable expense, limiting accessibility for research projects, especially in developing countries. For example, commercial satellite images obtained from WorldView-3 provide high resolution, but the high cost restricts their use in ecological studies [5]. In response to this, several studies are encouraging the use of drones [6, 7, 8, 9].

Drone imagery, as an alternative to satellite imagery, offers several advantages in terms of accuracy and cost, but its inappropriate use, such as frequent flights at noticeable heights of noise and vision, can generate unexpected wildlife behaviors. Drones can capture high-resolution imagery needed to detect small species and perform detailed monitoring in specific areas [6]. In addition, they allow for real-time monitoring and data collection in low-connectivity conditions, which is crucial for the study of remote and hard-to-reach areas [7]. These capabilities would most likely improve the efficiency and accuracy of SDMs, enabling informed decision-making for biodiversity conservation and management.

Several studies have confirmed that the use of drones with machine learning (ML) algorithms improves wildlife detection, reducing reliance on manual assessments and increasing the accuracy of the data collected. This technology not only facilitates obtaining accurate data at lower cost, but also minimizes disturbance to monitored species, significantly improving conservation efforts [10]. The integration and processing of images obtained from drones using MaxEnt algorithms and their subsequent advanced analysis in `R` can be convenient to develop a detailed SDM.

The objective of the systematic literature review is to provide a method to assess variability in the conduct of studies and data analysis, identify and summarize studies already conducted, measure the consistency and quality of results, and target knowledge gaps to be investigated, using a systematic literature review approach in drone-based SDMs.

This paper presents proposals for future research in terms of the methods used, the systematic use of drones and satellites in data collection, the identification of best practices, and the establishment of standards to ensure the reproducibility and accuracy of SDM studies. The first part of this document details the importance and necessity of conducting a Systematic Literature Review for the development of SDMs. In the second part, the relevant definitions of the elements that compose the development and implementation of an SDM using data obtained from drones and analyzed with `R` software are presented.

Then, in the third part, the methodology for obtaining SDMs is described, structured in five phases derived from five research questions. The fourth part of the paper presents the systematic review used to conceptualize the research questions, providing a statistical summary of the literature reviewed and an analysis of similar work in the creation of SDMs with drones. In the fifth part, the research questions are discussed through a comparative analysis between drone-based and satellite-based imagery solutions. The paper concludes with the proposed solution.

2. Species Distribution Model

Forest ecosystems face growing environmental pressures, requiring sustainable and proactive conservation strategies. Species Distribution Models (SDMs) are valuable tools for estimating species' potential distributions and habitat availability by analyzing ecological niches through environmental data and raster images. These models help predict responses to environmental changes and support decision-making at multiple scales, including protected area designation and climate policies.

When built with current data and properly calibrated, SDMs can be adapted across different spatial and temporal contexts, making them essential for biodiversity monitoring and adaptive management [11, 12].

SDMs are key tools in biodiversity and conservation, but assessing their reliability at unsampled sites is difficult, especially where there are sampling biases [13]. There are numerous ecological niche modeling techniques, such as the Genetic Algorithm for Rule Set Prediction (GARP) or MaxEnt, which are the most widely used and generally employ, according to [13], two types of data:

1. Records of the occurrence of the species, such as geographical data (latitude and longitude) of the sites where specimens have been collected or recorded.

2. Layers of variables that are related to the distribution of the species. These may be climatic (e.g., temperature, precipitation), vegetation type, soil type, and terrain slope, among others.

SDMs use environmental data and species occurrence records to generate niche models that represent suitable conditions such as climate, altitude, and vegetation. These models can be projected geographically to predict where the species may occur, producing maps of potential distribution. By identifying environmental associations, SDMs define optimal conditions for viable populations, following the BAM framework proposed by [1].

The method identifies areas with similar environmental features to known presence sites, enabling spatial predictions based on mathematical similarity, although models retain a certain degree of uncertainty regarding species distribution patterns of species [2].

2.1. Biotic Abiotic Movement (BAM)

The BAM method for creating an SDM begins by identifying the biology of the species, then assessing the accessibility of areas, and finally incorporating environmental variables.

This allows for a holistic understanding of a species' likely distribution, facilitating robust models for conservation studies. The BAM diagram, as illustrated in Figure 1, is a conceptual tool for modeling species distribution, integrating biology (B), accessibility (A), and environment (M) [14].

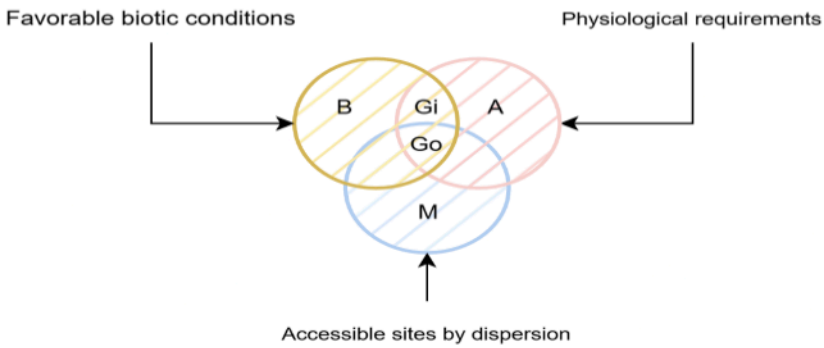


Figure 1: *The BAM diagram [14].*

In the BAM Diagram, shown in Figure 1, the occupied area of a species (G_o) is illustrated as the intersection of its three components: the biotic (B), abiotic (A), and movements (M), as:

$$G_o = B \cap A \cap M$$

The area G_i occurs at sites that are favorable both biotically and abiotically, but that the species has not been able to access ($B \cap A \cap M$) [14].

2.2. Ecological niche

The ecological niche encompasses the environmental conditions and resources a species needs to survive and thrive, including abiotic factors like temperature and humidity, and biotic factors such as food and competition [15].

Species Distribution Models (SDMs) predict a species' geographic distribution by modeling its ecological niche using environmental and occurrence data [2]. These models identify areas of high habitat suitability and quantify how environmental conditions influence species presence [16].

The ecological niche and SDMs are related through their connection to species distribution, but they differ in approach and use. The ecological niche focuses on a species' environmental requirements in theory, whereas SDMs are practical tools for mapping and predicting species distributions in real landscapes, aiding conservation and management decisions [17].

2.3. Raster images

A raster is a format for storing, analyzing, and displaying geographic data. It consists of a grid of cells or pixels arranged in rows and columns. Each cell, which can be rectangular (not necessarily square), contains information such as coordinates and attribute values. Rasters represent continuous surfaces and recognize areas with similar characteristics, though they do not define clear boundaries like vector polygons:

- Category: land use
- Magnitude: pollution, precipitation, etc.
- Height: distance, slopes, orientation, mass, hydrographic basin, etc.
- Spectral value: satellite images, aerial photographs, etc.

A raster image can cover an area of 100 km^2 using one hundred cells, each measuring 1 km^2 with equal width and height [1]. Raster and image data are useful for a wide variety of applications. In a geographic information system (GIS), raster and image data are typically used for the following:

- Images as base maps
- Raster as surface maps
- Raster as thematic maps

Raster images obtained via drones offer advantages over satellite-acquired data, as noted in studies like [18], which highlight their higher accuracy and ability to provide continuous data representation. Additionally, [19] emphasizes the importance of raster imagery in enhancing geospatial data storage and access to scientific information. This enables field researchers to obtain accurate and relevant data on species. The raster (or cell-based) data model is widely used in the GIS industry for detailed biodiversity research and assessment, as illustrated in Figure 2.

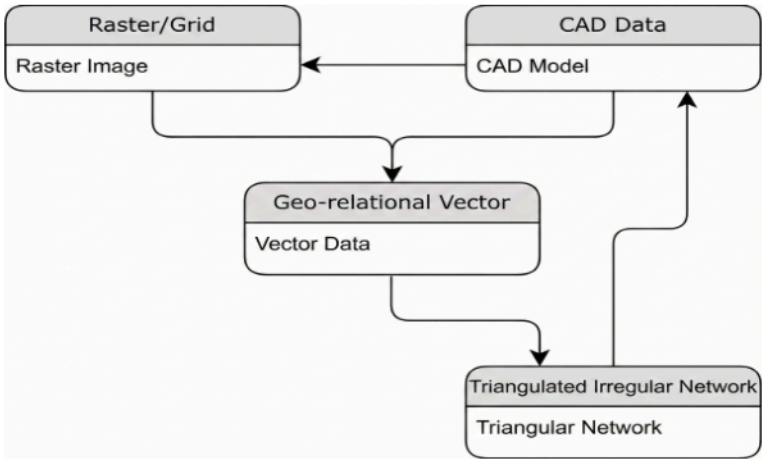


Figure 2: *Network diagram illustrating the data models: CAD data, Raster/Grid, Geo-relational Vector and Triangulated Irregular Grid [20].*

The network diagram in Figure 2 shows how geospatial data are combined to create a Triangulated Irregular Network (TIN). Raster and CAD data are converted into vector format to build the TIN, supporting detailed surface analysis. This is essential for surveying and civil engineering, enabling the integration and transformation of diverse geospatial data for advanced uses.

2.4. Drones and wildlife

Drones are aircraft that could fly unmanned and autonomously. The main advantages they offer over other methods of wildlife monitoring are:

1. High spatial resolution, as low-altitude flight allows images to be taken in detail, and
2. High temporal resolution, as their ease of deployment allows flights to be made as frequently as desired [21].

Currently, drones are being used to study various species of fauna. In the field of ornithology, there are several works of census of waterfowl and gregarious bird colonies, population monitoring of penguins, geese, and inspection of raptor and corvid nests, among others [22].

Four impacts are considered in this context and are shown below:

- **Technological impact.** By comparing the current approach to species distribution modeling using satellite imagery with the method employing drone-based data collection, the profitability of the product obtained is determined in terms of data availability, quality, accuracy, costs and safety.
- **Economic impact.** It offers the ability to reduce costs associated with traveling to remote and difficult-to-access areas [18], as well as improve processing efficiency and save time during project implementation [21]. Also, according to [6] there is an economic advantage of using data obtained by modeling images from drones compared to the high costs associated with the acquisition of data from satellite images.
- **Social and scientific impact.** Promotes conservation and scientific research in ecological reserves. Provides georeference data of protected environments without affecting social organizations [23]. The availability of updated data facilitates the study of biodiversity and promotes conservation in natural areas [18, 24].
- **Environmental impact.** The widespread use of drones can disturb wildlife and damage fragile habitats, causing stress and behavioral changes [25]. Repeated flights may harm biodiversity in areas like wetlands [26]. To reduce impacts, establish protocols limiting flight frequency and duration [25], and conduct environmental assessments beforehand [27]. Drone operations must be responsibly managed to avoid ecological harm [25].

The integration of drones with SDMs represents a scientific advancement in ecological research. Drones capture high-resolution images for detailed habitat mapping. When used with models like MaxEnt, they support climate analysis and conservation planning.

Drones also help collect species presence and absence data, improving SDM accuracy through machine learning. Together, these tools boost data efficiency and enable faster biodiversity conservation responses, as recent studies demonstrate (see Table 1).

Table 1: *Research works on SDM using drones and the methodology applied*

Reference	Drone Use Methodology	Focus on SDM	Species of Fauna Studied
[27]	Drones are used for aerial imaging and habitat mapping, followed by SDM to analyze and compare different climate scenarios.	Comparison of climate scenarios using aerial imagery.	Oriental quoll (*Dasyurus viverrinus*).
[3]	Drones are used to collect high-resolution spatial data, which is then integrated with predictive SDMs and satellite image analysis.	Predictive models combined with satellite imagery.	Seagrasses (*Cymodocea nodosa*).
[28]	Drones used to collect species presence/absence data, incorporating machine learning algorithms to improve the accuracy of distribution models.	Machine learning algorithms to improve SDM accuracy.	Various species of terrestrial fauna.
[29]	Evaluation of the use of small drones for the collection of species distribution and behavioral data in different habitats.	Behavioral and distribution data collection.	Birds and small mammals.

3. Materials and Methods

It is essential to look for alternatives to face the problem of the high cost of the analysis of satellite images necessary for the generation of orthophotos and the creation of SDMs. It is also important to establish an adequate method for the detection of specific ecosystems for each species.

Therefore, an effective identification of biodiversity patterns and their trophic chains is required. Also, it is essential to have an accurate image analysis, without taxonomic bias, and using non-invasive mechanisms to the SDM. Based on these concerns, five questions are posed in search of evidence, descriptively, transversally and in the field, as follows:

- **Q1.** What tools are used for the processing and georeferencing of images from drones for the creation of SDMs?
- **Q2.** What variables are used to promote accuracy in the development of SDMs?
- **Q3.** How does geo-technology affect the creation of SDMs?
- **Q4.** Which data automation methods allow for efficient creation of SDMs?
- **Q5.** What is the feasibility of combining drones and satellites for SDM creation?

This document synthesizes the information currently available through a literature review in an orderly fashion. For this purpose, the inclusion and exclusion criteria and the combination of terms and keywords of the project with the search string (*"accuracy" OR "distribution model" OR "ecological niches" OR "drones" OR "monitoring"*) and (*"wildlife species"*) are defined to obtain better results in the literature review sources: EBSCO, SCIELO, SCOPUS and Web of Science (WoS). Research articles published from 2019 onwards are considered.

The PRISMA diagram in Figure 3 describes the process of selecting studies for a systematic review through several phases. In the identification phase, a total of 608 records were obtained from several databases: EBSCO (62), Web of Science (90), SciELO (22) and SCOPUS (434).

In the eligibility phase, 116 records were selected for eligibility assessment. During this phase, 492 records were excluded for various reasons:

1. not answering the research questions,
2. not being classified, and
3. being duplicates.

This resulted in the screening of forty-seven records. In the screening phase, ninety-one records were eliminated because they did not answer the research questions posed. Finally, the inclusion phase culminated in the selection of forty-seven studies for systematic review.

This meticulous process ensures that only the most relevant and high-quality studies are included, increasing the validity and reliability of the review results. Each stage of the process is designed to reduce bias and ensure that the included studies are relevant and meet the criteria established for the review (see Table 2).

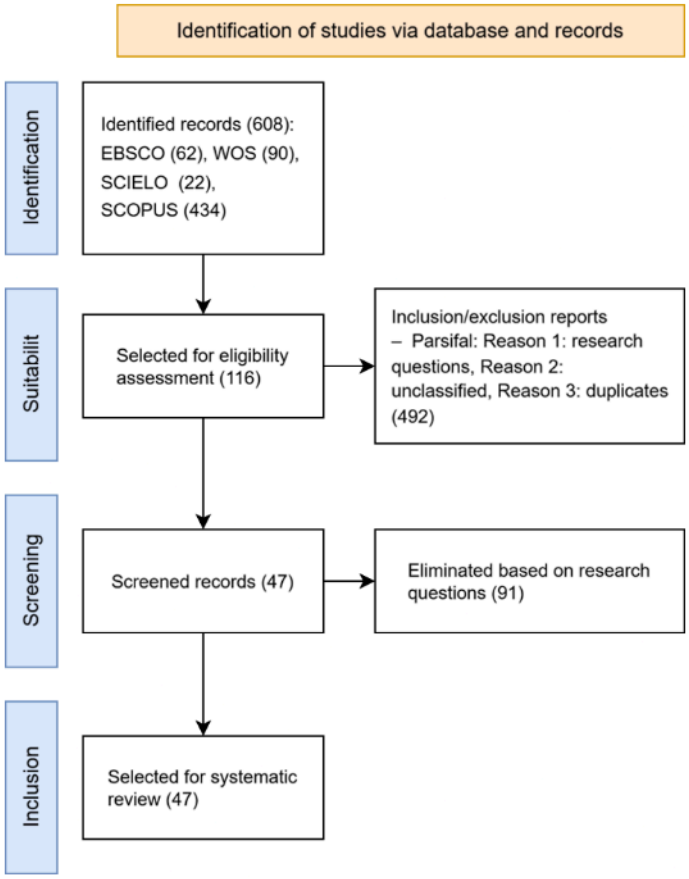


Figure 3: *Prism Diagram - Systematic Review [30].*

Table 2: *Summarizes two results obtained from the search and selection process of the scientific articles analyzed and shown in Figure 3.*

Search base	Found	(-) Rejected	(-) Non-classified	(-) Duplicate	(-) mc/exc	Accepted
EBSCO	62	33	1	9	8	11
WoS	90	68	8	0	5	9
SCIELO	22	0	22	0	0	0
SCOPUS	434	325	10	56	56	27
Total	**608**	**426**	**41**	**25**	**69**	**47**

On the other hand, in the review category there are some related articles such as the evaluation of camera trap data using artificial intelligence, the possibility of using camera traps to measure alterations induced by climatic changes in the activity patterns of elusive terrestrial vertebrates [31], successional habitat needs of at-risk species on privately owned land, and the use of drone imagery and machine learning-based algorithms for data collection. However, none of the topics presented here have already been addressed in those studies [7].

4. Analysis of Research Questions

4.1. Tools for georeferencing and processing of drone imagery in SDM creation

The use of GPS in wildlife habitat data collection allows the monitoring of bird migration routes and has revealed patterns critical to their survival [32]. In mammals, tracking bear territories [33] has provided valuable information on their behavior and habitat. In addition, sea turtle tracking [34, 35] has identified feeding areas, improving conservation strategies.

The use of camera traps allows the collection of data on the habitat of vertebrate species in wildlife studies. In Africa, camera traps have made it possible to study how human activity affects the behavior of African elephants in Kasungu National Park, Malawi, by assessing factors such as distance to water bodies and vegetation cover [9]. In Namibia, camera traps have been used to estimate the density and abundance of unmarked ungulates, such as roan and sable, using Poisson binomial models [36]. Furthermore, a study on motion-based video compression has optimized the use of camera traps in resource-limited environments, improving monitoring duration and reducing storage requirements [37].

The combined use of camera traps, GPS, and drones has revolutionized the study of wildlife and their responses to climate change. Camera traps have enabled the identification of behavioral patterns in species such as guenons in the Congo, contributing to the conservation of endangered species [38]. GPS technology has been used to track migratory movements, as in the case of raptors in Europe, providing crucial data on changes in their habitats [39]. Finally, drones equipped with thermal cameras have been used to map coral reefs, helping to assess the impact of global warming on these ecosystems [40].

Table 3: *Tools for georeferencing and processing of images from drones in the creation of SDMs.*

Appearance	Tools / Programs	References
Georeferencing	GPS and Drone	[4]
Image Processing	Pix4Dmapper, Agisoft Metashape	[5]
Geospatial Analysis	ArcGIS, QGIS	[3]
Species Distribution Modeling (SDM)	MaxEnt, Random Forest	[6]

Table 3 provides a detailed overview of the aspects of image processing and the various tools and techniques used in georeferencing and image processing. In addition, relevant literature references supporting the use of these technologies are included, thus facilitating a broader and more informed understanding of their efficacy and applicability in wildlife conservation and study (see Figure 4).

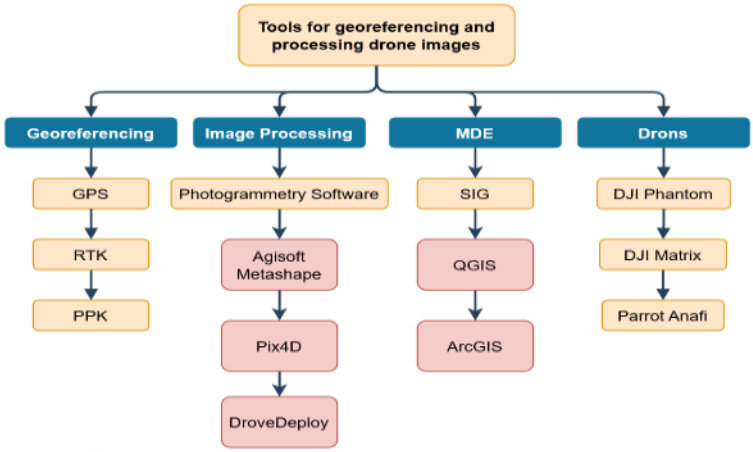


Figure 4: *Graph diagram illustrating existing methods for georeferencing and processing drone imagery in the creation of SDMs [3].*

On the other hand, it is important to emphasize that the use of images captured by drones, processed with the MaxEnt algorithm and analyzed in R software, offers an effective solution to develop SDMs. This technique combines

the high spatial resolution of drone imagery with the predictive capability of MaxEnt. Recent studies confirm that this method can predict areas of high probability of species presence with an accuracy comparable to traditional methods, but at a significantly lower cost and with greater operational flexibility.

4.2. Tools for georeferencing and processing of drone imagery in SDM creation

SDMs also attempt to predict whether a species will be present or absent in a specific area based on some environmental variables; the most common environmental variables include temperature, precipitation, topography, vegetation cover, soil type, elevation, moisture, and land use patterns.

Table 4 presents a detailed compilation of the variables used in various SDM studies employing drone imagery. This table highlights both the independent and dependent variables used in such studies, providing a comprehensive overview of the methodologies applied and analytical approaches adopted.

The independent variables include environmental and geographic factors such as altitude, vegetation cover, slope, and proximity to water bodies. These variables allow us to understand how different habitat elements influence the distribution of species. For example, studies such as [35] have used aerial imagery to capture accurate data on vegetation and topography, which has allowed more accurate modeling of species distribution. On the other hand, the dependent variables are usually presence/absence or abundance data of the species under study. These variables are derived directly from field observations and analyses of images captured by drones. [6] have shown that the use of drones to collect presence/absence data significantly improves the spatial and temporal resolution of SDMs.

The integration of these variables into models provides insight into ecological relationships and helps predict changes in species distribution under different environmental scenarios. The accuracy and high resolution of drone imagery facilitates the capture of fine details of the habitat, which is fundamental for the development of SDMs.

Table 4: *Variables used in different SDM studies with drone imagery, highlighting independent and dependent variables.*

Article / Project	**Independent Variables**	**Dependent Variables**	**Variables Not Considered**
Use of drones for biodiversity monitoring [41]	- Vegetation Cover - Soil Type - Elevation (SDM) - Surface Temperature	- Species presence - Species distribution	- Soil Moisture - Precipitation
Analysis of bird distribution in urban areas [24]	- Vegetation Cover - Land Use - Distance to Water Bodies - Human Pressure - Vegetation index NDVI	- Presence of endemic plants - Plant distribution	- Soil type - Competition with other species
Forest health assessment using drones [9]	- Canopy cover - Soil type - Soil moisture	- Tree health - Distribution of tree species	- Elevation - Surface Temperature
Analysis of amphibian distribution in protected areas [42]	- Vegetation cover - Proximity to bodies of water	- Presence of amphibians - Diversity of amphibian species	- Land Use - Human Pressure

SDMs require accurate and detailed data on a variety of environmental variables. Fortunately, there are multiple open and accessible data sources that provide information for these models. Some of the most relevant and reliable sources for downloading data on environmental variables, the tools used, and a possible re-search project using these databases are described below in Table 5.

Table 5: *Sources for downloading environmental data for use in SDMs.*

Tool	Description of the database	Possible scientific project
WorldClim	Global database offering high-resolution climate data.	Species distribution modeling, precipitation and historical climate analysis.
Global Biodiversity Information Facility (GBIF)	Comprehensive source of biodiversity data including species distribution and patterns.	Analysis of species distribution patterns and their changes.
EarthExplorer (USGS)	Access to satellite data and derived products.	Building databases, land cover, and remote sensing analysis.
Copernicus Open Access Hub	Provides access to high-resolution satellite data.	Study of ecosystem dynamics and water resources through remote sensing.
TerraClimate	Provides climate and water balance data on a monthly scale from 1958 to the present.	Research on the impact of climate change on water availability.
CHELSA	High-resolution climate data from 1979 to the present.	Species distribution modeling based on high-resolution climate data.

Some of these sources may have restrictions and/or licenses for their use; therefore, it is advisable to review the policies of each source before using them to obtain data [1]. After the systematic review carried out for this document, and considering several parameters derived from multiple investigations on Species Distribution Models (SDMs), Figure 5 illustrates the variety of data required to build an accurate and robust model.

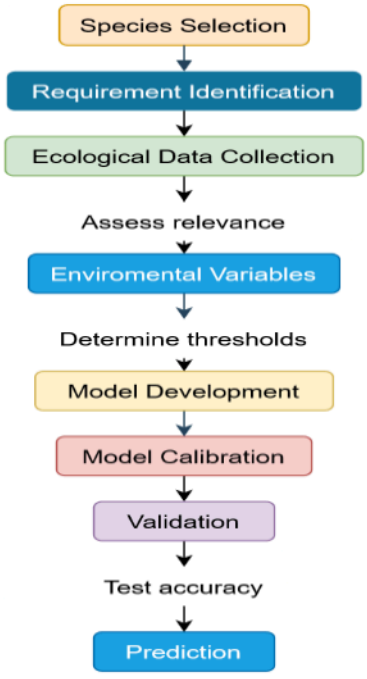


Figure 5: *Requirements for species selection and subsequent distribution model development [7]*

As can be seen in Figure 5, each type of data contributes significantly to the understanding of the habitat and the conditions necessary for the presence of the target species.

- **Species Occurrence Data:** Provides direct information on where the species has been found, helping to define its current and potential distribution.
- **Soil Data:** Is vital for understanding the edaphic conditions that may favor or limit the presence of the species.
- **Vegetation Data:** Helps identify plant associations that are critical to the species in terms of food availability, shelter, and other ecological requirements.

- **Topographic Data:** Allows understanding how the topography of the area influences species distribution by affecting factors such as solar exposure, slope, and elevation.
- **Climate Data:** Is important for evaluating how climatic conditions, such as temperature and precipitation, affect species distribution.

Careful selection of variables in the generation of Species Distribution Models (SDMs) is essential to improve the robustness and transferability of the models due to their direct and indirect effects. Environmental variables, such as climate, topography, and vegetation, determine suitable habitats for species and their geographic distribution [2]. The inclusion of bioclimatic and edaphic variables allows for more accurate predictions of changes in species distribution driven by factors such as climate change [8].

4.3. Impact of geo-technology on the automation of SDMs

Advanced tools such as the `R` software environment enable the automation of SDM construction and evaluation processes, improving both reproducibility and analytical accuracy. In addition, the application of machine learning techniques, such as ensemble models, has enhanced the predictive capability of SDMs by combining multiple algorithms to increase the robustness and accuracy of predictions [9]. These advances facilitate the integration of spatial and environmental data, thereby optimizing biodiversity management and conservation [10].

Table 6 presents in detail how geo-technology has revolutionized the automation of SDMs by providing advanced tools for the collection and analysis of geospatial data. The combined use of drones and satellites enables the acquisition of high-resolution imagery in near real time, leveraging the strengths of each technology. Satellites provide wide and continuous coverage of large geographic areas and long-term datasets that support the monitoring and analysis of large-scale environmental changes. In contrast, drones operate at low altitudes and capture very high-resolution imagery, allowing detailed analyses of specific areas and the precise identification of microhabitats with distinct terrain features. Furthermore, the integration of machine learning algorithms and Geographic Information Systems (GIS) facilitates the processing of large volumes of data, optimizing the prediction of species distribution.

Table 6: *Geo-technology in the automation of SDMs.*

Research Study	Description of the Study	Impact of Geo-Technology
[11]	Use of machine learning algorithms to improve the accuracy of SDMs in Australia.	Improved accuracy and robustness of models facilitating biodiversity management.
[12]	Integration of remote sensing data and predictive models to map the distribution of endemic plants in the Swiss Alps.	Increased accuracy in the identification of critical habitats and vulnerable species.
[13]	Application of MaxEnt and high-resolution drone data to model bird distribution in U.S. national parks.	Real-time, high-resolution data acquisition to optimize species conservation.
[14]	Implementation of geoprocessing techniques and satellite data to assess the impact of climate change on amphibian distribution in India.	Detailed evaluation of environmental changes and their influence on species distribution to support conservation strategies.

Figure 6 shows the relationship between geo-technology and the creation of Species Distribution Models (SDMs). Geo-technology encompasses Geographic Information Systems (GIS), remote sensing, and photogrammetry, all of which are fundamental for generating SDMs. GIS enables the integration and analysis of geospatial data, while remote sensing technologies, such as satellites and drones, provide elevation and altitude-related data [43].

Photogrammetry uses aerial imagery to construct accurate topographic maps [15]. The resulting SDMs are essential for various applications, such as urban plan-ning, environmental studies and agriculture, where specific analysis tools are used to assess and manage the terrain [16].

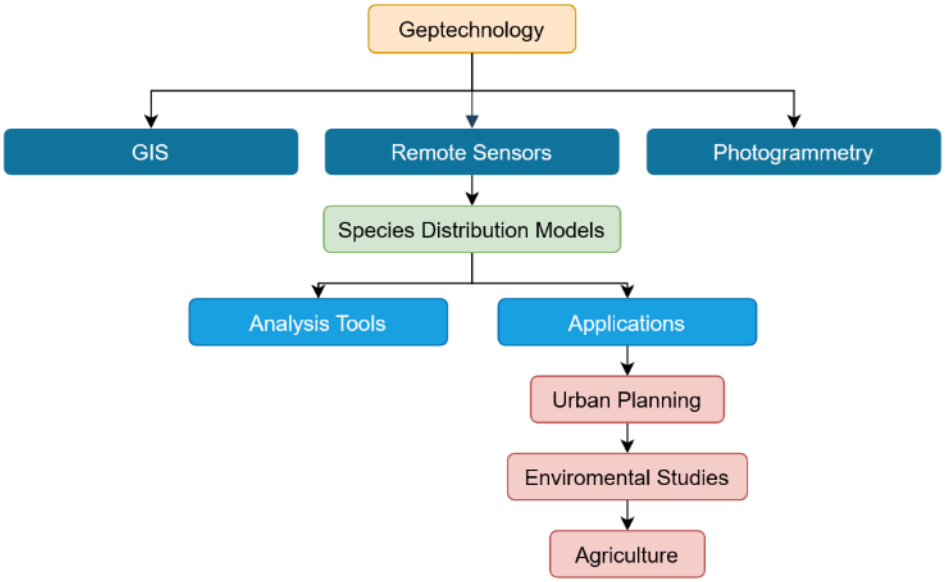


Figure 6: *Relationship diagram between geo-technology and the creation of Digital Elevation Models (SDM).*

4.4. Data automation methods for efficient creation of SDMs

Each method is different for a variety of reasons, as shown in Table 7, which identifies techniques, biological data types, and environmental variable formats used in the creation of SDMs. This table highlights the differences in data automation techniques, allowing a clear view of how each approach handles different types of biological information and environmental variables. This comparative analysis allows understanding the applicability of each method in SDMs, helping researchers to select the most appropriate methodology for their studies [2].

Table 7: *Data automation methods for creating SDMs.*

Method	Techniques Used	Type of Biological Data	Environmental Variables Format
Generalized Linear Models (GLM)	Regression and statistical analysis	Presence data, abundance data	Continuous variables, categorical variables
MaxEnt	Maximum entropy	Presence data	Continuous variables, categorical variables
ML	Neural Networks, Random Forest, SVM	Presence data, abundance data	Continuous variables, categorical variables
Other Data Automation Method	Machine learning algorithms	Presence data, abundance data	Continuous variables, categorical variables
Other Methods	Varies by method	Varies by method	Mainly continuous variables

Generalized Linear Models (GLM) use regression and statistical analysis techniques and are suitable for presence and abundance data with continuous and categorical variables [2]. MaxEnt, based on the principle of maximum entropy, is particularly effective for presence data and also handles continuous and categorical variables [17].
Machine Learning, which includes techniques such as neural networks, Random Forest and Support Vector Machines (SVM), has been noted for its ability to handle both presence and abundance data, with continuous and categorical environmental variables [6]. Another data automation method also uses machine learning algorithms, adapting to presence and abundance data, and continuous and categorical variables [18]. Other methods vary according to the technique used, but generally focus on continuous variables [11]. This diversity of methods and techniques allows a

more appropriate selection according to the specific needs of the study and the types of data available.
The methodological approach in Species Distribution Models (SDMs) is based on the nature of the occurrence data. The techniques used fall into three main categories. Table 8 details these categories, shows the differences in the types of data employed, and provides specific examples of methods in each. This comparative analysis provides a better understanding of the applicability of each technique, facilitating the selection of the most appropriate method based on the available data and the objectives of the study.

Table 8: *Categories of techniques used in the development of MOUs.*

Method Category	**Description**	**Type of Data Used**	**Examples of Techniques / Methods**	**References**
Descriptive	Based solely on presence information.	Presence data	First methods used in species modeling.	[19]
Discriminants	They require presence and absence data to build the classifier.	Presence and absence data	Generalized Linear Models (GLMs), Support Vector Machines (SVMs)	[19, 20]
Hybrid or mixed	They combine descriptive and discriminant methods, generating pseudo-absences to improve accuracy.	Presence and pseudo-absence data	MaxEnt with pseudo-absences	[21]

The literature shows that the first automation methods used in SDM are characterized by using only presence data, disregarding absence or background data; these methods are grouped into three types: profile, classical regression and Machine Learning, as shown in Table 9.

Table 9: *SDM automation methods Category Methods.*

Category	**Methods**	**Description**
Profile methods	BIOCLIM, ANUCLIM	Classical techniques based on geographical or environmental contexts [22].
Profile methods	Mahalanobis, DOMAIN	Mathematical distance methods [22].
Profile methods	ENFA methodologies based on expert opinions	Similarity-based methods and deductive approaches [23].
Classical regression methods	Linear regression	Identification of relationships between environmental variables and species presence [11].
Classical regression methods	Linear regression	Predictions of species distribution [11].
ML Methods	Classification and Regression Trees (CART), Artificial Neural Networks (ANN)	Flexible nonparametric regression models including older techniques [13].
ML Methods	Random Forest (RF), Genetic Algorithm for Rule Set Production (GARP), Support Vector Machines (SVM), Maximum Entropy modelling (MaxEnt)	Popular and versatile models in the last decade [24].

The use of ML in the development of SDMs has proven to be a powerful tool for biodiversity conservation [10]. Advanced techniques such as random forests and deep neural networks allow the integration of large volumes of environmental and species occurrence data, improving the accuracy of predictions [14]. Recent studies have shown that the use of ML algorithms outperforms traditional methods in terms of predictive ability and handling of complex data [9]. This facilitates the identification of critical habitats and the planning of effective conservation strategies [5].

4.5. Feasibility of combining drones and satellites to create SDMs

For example, [25] demonstrate that the synergy between drones and satellites allows obtaining SDMs with unprecedented resolution, facilitating detailed monitoring of habitats and species in inaccessible or extensive areas. In addition, the study of [4] highlights how the combined use of these technologies can improve species management and conservation by providing more accurate data on their distribution and abundance.
The choice between satellite imagery and drone imagery for SDMs depends on several factors, such as required image resolution, coverage area, cost, timeliness, detail specificity, among others. As a result, the discussion typically focuses on the advantages and disadvantages of each technology.

Table 10 shows the comparison between the use of drones and satellites, revealing specific advantages and disadvantages for each method in the capture of SDM data [26]. Drones offer high spatial resolution and flexibility in real-time data capture, being more economical at small scales [27]. However, their use is limited by weather conditions and requires flight permits [44]. Satellites, on the other hand, provide global coverage and systematic monitoring, although at a high cost and with less detail in small areas [29].

Table 10: *Comparative table of the use of drones and satellites in the creation of SDMs.*

Drones	**Satellites**	**Comparison**	**References**
High spatial resolution	Global coverage	Drones provide greater detail in small areas compared to satellites.	[19]
Flexibility in data capture	Regular and systematic monitoring	Drones offer flexibility while satellites provide systematic monitoring.	[41]
Low cost of operation on a small scale	High cost for high resolution images	Drones are more economical on a small scale, while satellites have high costs.	[31]
Real-time data capture	Delay in obtaining data	Drones allow real-time data; satellites have delays.	[27]
Limited by weather conditions	Reduced impact due to weather conditions	Drones are more affected by weather than satellites.	[32]
Greater detail in small areas	Less detail in small areas	Drones offer greater detail in small areas; satellites cover large areas.	[29]
Flight permits required	No specific permissions required	Drones require flight permits, satellites do not.	[44]
Coverage limited to small areas	Suitable for large areas	Drones have limited coverage; satellites cover large areas.	[33]

The choice between drone or satellite imagery for developing Species Distribution Models (SDMs) depends on the needs of the study, scale, budget and data availability. Combining both sources can provide a more complete and accurate perspective. Drones are especially useful for identifying microhabitats and traces of small species, such as tracks and nests, that satellite imagery does not detect [15]. This information is important [34].

5. Discussion

In the development of SDMs using MaxEnt, significant advantages over other modeling tools stand out. MaxEnt offers high accuracy and is especially effective for working with presence-only data due to its maximum entropy approach. Unlike logistic regression or decision trees, MaxEnt better handles nonlinear relationships and interaction effects between variables [6]. Recent studies confirm its superior ability to model species distributions accurately and effectively [36]. However, the choice of the modeling tool also depends on the dataset, its characteristics and the objective of the study, where methods such as Random Forest or Boosted Regression Trees may be more appropriate in certain contexts [6].

In addition to R, other tools such as Python are also widely used for analyzing species distribution data. However, R offers advantages in these cases due to its extensive collection of specialized packages for ecological and biological analyses, such as `dismo` and `ecospat`. These packages are specifically designed to handle species presence-absence data and to develop robust predictive models. R also offers an active community and abundant resources for data visualization and advanced statistical analysis, which facilitates interpretation and informed decision making [37].

Replication of SDMs is possible due to several scientific and methodological factors:

- Methodological Consistency,
- Data Quality,
- Standard Algorithms,
- Environmental Variables,
- Code Scripts,
- Documentation and Publication.

Unlike traditional methods, SDMs are better when advanced geo-technology, such as Machine Learning, is used. The use of ML algorithms makes it possible to manage large volumes of data and to relate environmental variables and species presence, improving the accuracy and robustness of SDMs [38].

The combined use of satellite and drone technology largely depends on the methodology employed, the spatial coverage required, and the climatic conditions of the study area. From a climate-related perspective, drones offer greater control under specific weather conditions, whereas satellites provide more consistent data across varying climates. However, the effectiveness of drone usage may be limited if proper protocols for non-invasive data collection are not followed. Economically, the choice between drones and satellites should be guided by the project's specific needs, aiming to optimize resources and maximize benefits through a contextualized analysis.

This study contributes to the field of species distribution modeling by integrating drone-based remote sensing with open-source tools to develop high-resolution ecological models [42]. Compared to traditional approaches such as satellite-based MaxEnt or generalized linear models, the use of UAV-derived imagery combined with free and open-source software (FOSS) allows for greater spatial precision and adaptability at local scales [45].

Unlike coarse-resolution satellite data, drone-acquired images provide fine-scale habitat details that are essential for detecting microhabitat preferences and localized environmental changes [46]. Additionally, this approach reduces costs and technical barriers compared to proprietary GIS platforms, promoting accessibility and reproducibility in biodiversity research [47].

While conventional methods often rely on historical or interpolated environmental data, our workflow enables real-time monitoring and rapid model updating, enhancing responsiveness to dynamic ecological conditions. This methodology is particularly relevant for conservation planning in data-poor regions, where high-resolution, site-specific models are needed but resources are limited [48].

Future research should focus on the integration of UAV-based remote sensing with open-source software to enhance the accuracy and accessibility of SDMs. While UAVs offer high-resolution spatial data ideal for local-scale biodiversity assessments, their full potential can only be realized through scalable workflows that combine image acquisition, processing, and modeling in a unified framework. Recent studies have shown promising results using open-source tools such as QGIS, GRASS GIS, and Python-based libraries (e.g., GDAL, GeoPandas, scikit-learn) for habitat mapping and species detection [42], [49].

However, there is still a need for standardized protocols that ensure reproducibility and interoperability across platforms. Additionally, future work should explore the integration of deep learning techniques with UAV imagery to automate species classification and improve model generalization [45].

The use of freely available environmental raster layers, combined with cloud computing platforms like Google Earth Engine, could further expand the applicability of SDMs to larger geographic areas while maintaining high resolution [50]. These advancements will not only democratize access to advanced modeling tools but also support conservation planning in data-poor regions.

6. Conclusions

The development of a SDM benefits the care of the environment and biodiversity development, but also the participating areas are benefited. Thus, for example, computing is strengthened by the boost in the development and application of advanced Machine Learning algorithms and geospatial data processing. For biology, SDMs offer tools for understanding and predicting species distribution, aiding in biodiversity conservation and ecosystem management. Collaboration between the two disciplines facilitates interdisciplinary approaches, improving the accuracy and applicability of models in ecological and environmental studies.

Clear documentation and well-defined guidance facilitate accurate replication of studies of more species in different ecological reserves, ensuring consistency and comparability of results. This promotes a better understanding of ecological dynamics and contributes to the development of conservation strategies. In addition, accessibility to standardized methodologies fosters collaboration among researchers, accelerating scientific progress and the practical application of findings in diverse computational, ecological, and geographic contexts.

To replicate the study in another ecological reserve and for other species, it is necessary to have a clear methodology, robust and processed data sources, machine learning tools algorithms, environmental variables and code scripts preferably in R or Python. In summary, SDM replication is based on the application of standardized methodologies, the use of high-quality data and the implementation of widely accepted scientific algorithms and tools. This ensures that the results obtained are reliable and comparable in different ecological scenarios.

Machine learning algorithms and data processing techniques in platforms like R and Python enable the integration of diverse data sources. These tools not only streamline the handling of large datasets but also enhance the accuracy

and robustness of predictive models through libraries such as `scikit-learn` and `caret`. Combining remote sensing and environmental data significantly improves the performance of SDMs, as shown by recent studies [39]. This multi-dimensional approach advances the analysis and interpretation of complex data in ecological and conservation studies. The hybrid use of drones and satellites is more feasible than using either technology alone for developing SDMs. Combining both allows researchers to leverage the high accuracy of drones and the broad temporal coverage of satellites [40].

References:

[1] A. Jiménez-Valverde, P. Acevedo, A. M. Barbosa, J. M. Lobo, and R. Real, "Maximum entropy modeling of species geographic distributions: A review of recent developments and applications," *Ecosphere*, vol. 12, no. 1, p. e03320, 2021.

[2] E. Gutiérrez and I. Trejo, "Application of different types of data in the distribution modeling of tree species in mexico," *Colombia Forestal*, vol. 26, no. 1, pp. 48–63, 2023.

[3] M. Mo and K. Bonatakis, "Approaching wildlife with drones: using scientific literature to identify factors to consider for minimising disturbance," *Australian Zoologist*, vol. 42, no. 1, pp. 1–29, 2022.

[4] Y. Huang *et al.*, "Realized ecological forecast through an interactive ecological platform for assimilating data (ecopad, v1.0) into models," *Geoscientific Model Development*, vol. 12, no. 3, pp. 1119–1137, 2019.

[5] R. G. Mateo *et al.*, "Hierarchical species distribution models in support of vegetation conservation at the landscape scale," *Journal of Vegetation Science*, vol. 30, no. 2, pp. 386–396, 2019.

[6] R. Valavi, J. Elith, J. J. Lahoz-Monfort, and G. Guillera-Arroita, "Modelling species presence-only data with random forests," *Ecography*, vol. 44, no. 12, pp. 1731–1742, 2021.

[7] N. Millner, A. M. Cunliffe, M. Mulero-Pázmány, B. Newport, C. Sandbrook, and S. Wich, "Exploring the opportunities and risks of aerial monitoring for biodiversity conservation," *Global Social Challenges Journal*, vol. 2, pp. 2–23, 2023.

[8] D. Zurell, S. A. Fritz, A. Rönnfeldt, and M. J. Steinbauer, "Predicting extinctions with species distribution models," *Cambridge Prisms: Extinction*, vol. 1, 2023.

[9] M. Rashid, B. S. Bari, Y. Yusup, M. A. Kamaruddin, and N. Khan, "A comprehensive review of crop yield prediction using machine learning approaches," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 63 406–63 439, 2021.

[10] D. Boral and S. Moktan, "Modelling current and future potential distribution of medicinal orchids in darjeeling eastern himalaya," *Plant Ecology*, vol. 225, no. 3, pp. 213–226, 2024.

[11] J. Elith and J. R. Leathwick, "Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time," *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, vol. 40, pp. 677–697, 2009.

[12] A. Guisan, T. C. Edwards, and T. Hastie, "Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions," *Ecological Modelling*, vol. 157, no. 2–3, pp. 89–100, 2002.

[13] S. B. Phillips, V. P. Aneja, D. Kang, and S. P. Arya, "Modelling and analysis of the atmospheric nitrogen deposition in north carolina," *International Journal of Global Environmental Issues*, pp. 231–252, 2006.

[14] S. Mohanty, S. Mustak, D. Singh, T. Van Hoang, M. Mondal, and C. T. Wang, "Vulnerability and risk assessment mapping of bhitarkanika national park, odisha, india using machine-based embedded decision support system," *Frontiers in Environmental Science*, vol. 11, pp. 1–19, 2023.

[15] C. Waldock *et al.*, "A quantitative review of abundance-based species distribution models," *Ecography*, 2022.

[16] F. E. Rodríguez-Manzo and L. Juárez González, "Exploración cualitativa sobre el ruido ambiental urbano en la ciudad de méxico," *Estudios Demográficos y Urbanos*, vol. 35, no. 3, pp. 803–838, 2020.

[17] J. Elith, S. J. Phillips, T. Hastie, M. Dudík, Y. E. Chee, and C. J. Yates, "A statistical explanation of maxent for ecologists," *Diversity and Distributions*, vol. 17, no. 1, pp. 43–57, 2011.

[18] Y. Zhang, Y. Feng, S. Wang, H. Li, and J. Chen, "Predicting the spatiotemporal dynamics of invasive species using ensemble machine learning and remote sensing data," *Ecological Informatics*, vol. 71, p. 101756, 2022.

[19] F. Fischer, É. Joetzjer, I. Maréchaux, I. F. Sun, and J. Chave, "Transferability of an individual- and trait-based forest dynamics model: A testcase across the tropics," *bioRxiv*, 2021.

[20] V. F. Frans, T. H. Oliver, T. H. August, N. J. B. Isaac, and L. V. Dicks, "Integrated sdm database: Enhancing the relevance and utility of species distribution models in conservation management," *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 13, no. 1, pp. 243–261, 2022.

[21] H. L. Kopsco, R. L. Smith, and S. J. Halsey, "A scoping review of species distribution modeling methods for tick vectors," *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022.

[22] A. Hua *et al.*, "Protecting endangered megafauna through ai analysis of drone images in a low-connectivity setting: a case study from namibia," *PeerJ*, vol. 10, 2022.

[23] C. Guillaumot, B. Danis, T. Saucède, G. Guillou, B. David, and T. Saucède, "Species distribution modelling of the southern ocean benthos: A review on methods, cautions and solutions," *Antarctic Science*, vol. 33, no. 4, pp. 389–406, 2021.

[24] J. Aguirre-Gutiérrez, F. Bisanzio, C. Capinha, and H. M. Pereira, "Mapping the gaps in alien species richness across contrasting european regions," *Diversity and Distributions*, vol. 28, no. 5, pp. 946–958, 2022.

[25] A. Iqbal, M. S. Mondal, W. Veerbeek, M. S. A. Khan, and H. Hakvoort, "Effectiveness of uav-based dtm and satellite-based sdms for local-level flood modeling in jamuna floodplain," *Journal of Flood Risk Management*, vol. 16, no. 4, pp. 1–19, 2023.

[26] D. Phiri, M. Simwanda, S. Salekin, V. R. Nyirenda, Y. Murayama, and M. Ranagalage, "Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 14, 2020.

[27] J. C. Padró, F. J. Muñoz, J. Planas, and X. Pons, "Comparison of four uav georeferencing methods for environmental monitoring purposes focusing on the combined use with airborne and satellite remote sensing platforms," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 75, pp. 130–140, 2019.

[28] M. D. Meza Castro, "El recurso de información y comunicación visual: imagen. apuntes en torno a las ciencias de la información y bibliotecología," *e-Ciencias de la Información*, vol. 8, no. 2, 2018.

[29] J. J. López and M. Mulero-Pázmány, "Drones for conservation in protected areas: Present and future," *Drones*, vol. 3, no. 1, 2019.

[30] PRISMA Group, "Prisma 2020 flow diagram," https://www.prisma-statement.org, 2020, accessed: 2024.

[31] X. Huang, L. Wang, and Y. Li, "Integrating remote sensing and geospatial modeling for forest management: A review of current approaches and future trends," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 18, p. 4567, 2022.

[32] M. M. Quamar, B. Al-Ramadan, K. Khan, M. Shafiullah, and S. El Ferik, "Advancements and applications of drone-integrated geographic information system technology—a review," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 20, p. 5039, 2023.

[33] J. Detka, H. Coyle, M. Gomez, and G. S. Gilbert, "A drone-powered deep learning methodology for high precision remote sensing in california's coastal shrubs," *Drones*, vol. 7, no. 7, 2023.

[34] J. C. Hernández Hernández, "La tecnología y la conservación de especies: el poder de las cámaras-trampa," *Revista Digital Universitaria*, vol. 24, no. 4, 2023.

[35] C. Merow *et al.*, "What do we gain from simplicity versus complexity in species distribution models?" *Ecography*, vol. 37, no. 12, pp. 1267–1281, 2014.

[36] D. Zurell, J. Franklin, C. König, and V. Bahn, "The machine learning-based species distribution models: Are they good for real-world predictions?" *Diversity and Distributions*, vol. 26, no. 8, pp. 852–864, 2020.

[37] B. Deneu, M. Servajean, P. Bonnet, C. Botella, F. Munoz, and A. Joly, "Convolutional neural networks improve species distribution modelling by capturing the spatial structure of the environment," *PLoS Computational Biology*, vol. 17, no. 4, 2021.

[38] A. Anand, M. K. Pandey, P. K. Srivastava, A. Gupta, and M. L. Khan, "Integrating multi-sensors data for species distribution mapping using deep learning and envelope models," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 16, 2021.

[39] B. Bansod, R. Singh, R. Thakur, and G. Singhal, "A comparision between satellite based and drone based remote sensing technology to achieve sustainable development: A review," *Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID)*, 2017.

[40] M. P. Corcoran, M. L. Hobi, V. A. Barber, and A. Mathys, "Applications and implications of unmanned aerial vehicles (uavs) in ecology," *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 12, no. 9, pp. 1564–1577, 2021.

[41] S. Ecke *et al.*, "Uav-based forest health monitoring: A systematic review," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 13, 2022.

[42] H. R. Gomes, M. Zortea, L. M. Carvalho, N. P. Ferreira, and R. A. da Silva, "Use of uav-based remote sensing for plant species distribution mapping in a tropical savanna," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 18, p. 2938, 2022.

[43] B. S. Krishnan *et al.*, "Fusion of visible and thermal images improves automated detection and classification of animals for drone surveys," *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, 2023.

[44] G. M. Mori *et al.*, "Predictive modelling of current and future potential distribution of the spectacled bear (tremarctos ornatus) in amazonas, northeast peru," *Animals*, vol. 10, no. 10, pp. 1–21, 2020.

[45] X. Zhu, Y. Zhao, W. J. Platt, and H. Liu, "Deep learning applications in species distribution models using remotely sensed data: A review," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 203, pp. 1–15, 2023.

[46] D. Rocchini, C. Ricotta, G. Bacaro, and S. Schmidtlein, "High-resolution mapping of plant diversity using uav-based spectral metrics," *Ecological Informatics*, vol. 73, p. 102014, 2023.

[47] K. Witt and R. R. Dunn, "Open-source tools in ecology: Bridging the gap between accessibility and scientific rigor," *Frontiers in Ecology and Evolution*, vol. 10, p. 881845, 2022.

[48] W. Turner, I. Costello, and A. Soria-Barreto, "Low-cost tools for biodiversity monitoring in under-resourced regions: Opportunities and challenges," *Biodiversity and Conservation*, vol. 30, no. 10, pp. 2649–2666, 2021.

[49] J. Torres, R. Cárdenas, and K. Rojas, "Open-source tools for drone image analysis in ecological monitoring: A case study in andean ecosystems," *Ecological Informatics*, vol. 75, p. 102067, 2023.

[50] J. Fernández-López and F. J. Ariza, "Assessing the performance of open-access environmental data for species distribution modeling using uav imagery," *Land*, vol. 12, no. 10, p. 1869, 2023.

IDEAS

Innovation & Development in Engineering and Applied Science

Journal homepage: https://revistasojs.utn.edu.ec/index.php/ideas

Situación actual de los factores y variables que influyen en la configuración de las estaciones de parada del transporte público

Current status of factors and variables influencing the configuration of public transport stops

Luis Garzón[a]

[a] Universidad Técnica del Norte, Av. 17 de Julio, CP 100105, Ibarra, Ecuador

Enviado: 09/08/2023, Aceptado: 19/09/2025, Publicado: 30/01/2026
Autor de correspondencia:
Luis Garzón: luisgarzon@utn.edu.ec
DOI: 10.53358/ideas.v8i1.950

PALABRAS CLAVE

accesibilidad,
seguridad,
estaciones de transporte público,
Comodidad,
ingeniería de transporte.

RESUMEN

La provisión de paradas de transporte público es crucial para acceder a servicios de calidad, no obstante, en zonas urbanas consolidadas de países del sur global suelen contar con una infraestructura mínima, lo que compromete la accesibilidad y la seguridad. El presente proyecto explora las percepciones de accesibilidad y seguridad en los usuarios del transporte público en la ciudad de Quito. El enfoque se basa en analizar los indicadores más relevantes en las paradas de autobuses, como la facilidad de desplazamiento y de acceso, el tamaño de la parada; así como indicadores relacionados con la seguridad, mediante el uso de la exploración factorial entre indicadores. Se recopilarán datos utilizando encuestas con el uso de equipos audiovisuales inmersivos (videos 360° y audífonos) para la presentación de 16 escenarios reales de paradas de autobús. Se utilizó una muestra de 529 usuarios entre estudiantes, personal administrativo de universidades. Se desarrolló un modelo de factores exploratorio para interpretar los indicadores recopilados. Los resultados muestran una buena relación de indicadores hacia los factores de accesibilidad y seguridad. Además, los resultados de los indicadores del transporte subrayan las influencias contextuales de ubicación residencial de los usuarios. Los métodos de encuesta aplicados permitieron recopilar la información a pesar de la complejidad perceptiva, pero las investigaciones futuras deberían ampliarse a muestras representativas e integrar variables latentes adicionales. Las intervenciones políticas requieren una infraestructura modular adaptable a los gradientes de densidad urbana.

KEYWORDS

Comfort,
accessibility,
transport engineering,
safety,
public transport stations.

ABSTRACT

The provision of public transport stops is crucial for accessing quality services. However, in consolidated urban areas in countries classified as 'developing', in-frastructure is often inadequate, thus compromising accessibility and safety. The present project explores the perceptions of accessibility and safety among public transport users in the city of Quito. The approach is predicated on the analysis of the most salient indicators at bus stops, including ease of movement and access, the size of the stop, and indicators related to safety. This analysis is conducted through factorial exploration between indicators. The data will be collected through the administration of surveys, utilising immersive audiovisual equipment such as 360° videos and headphones. This equipment will be employed to pre-sent sixteen real-life bus stop scenarios to the participants. The study utilised a sample of 529 users, encompassing students and administrative personnel from the university. An exploratory factor model was developed in order to interpret the indicators that had been collected. The findings indicate a positive correlation between the indicators and the factors of accessibility and safety. Furthermore, the findings concerning transport indicators underscore the contextual influences exerted by users' residential location. The survey methods employed in this study enabled the collection of data despite the perceptual complexity of the constructs under investigation. However, it is recommended that future research be expand-ed to include representative samples and incorporate additional latent variables to enhance the generalisability of the findings. The implementation of policy inter-ventions necessitates a modular infrastructure capable of adapting to variations in urban density.

1. Introducción

Los índices del nivel de servicio en las paradas permiten mejorar la eficiencia y la calidad hacia los usuarios del transporte público en las ciudades. Para ello, es esencial establecer medidas que den prioridad a los vehículos de transporte público ya que, últimamente se observa un entorno urbano más congestionado. Los índices del nivel de servicio en las paradas de transporte público en las paradas tienen como objetivo principal optimizar el desplazamiento de los usuarios y reducir los tiempos de espera en las paradas. Esto implica proporcionar condiciones favorables para el acceso y la salida de los vehículos de transporte público, garantizando un servicio más confiable y puntual. Los índices del nivel de servicio en las paradas de transporte público, implementan estrategias y medidas específicas en las infraestructuras y en la regulación del tráfico [1].

Estas pueden incluir la creación de carriles exclusivos para el transporte público, la sincronización de semáforos en favor de los vehículos de transporte público, el diseño eficiente de las paradas, entre otras. Los índices del nivel de servicio en las paradas del transporte público en las paradas no solo benefician a los usuarios, sino que también contribuye a una movilidad más sostenible y a la reducción de la congestión vehicular en las ciudades [2]. Además, fomenta el uso del transporte público como una alternativa viable y atractiva frente al transporte privado, promoviendo una mejor calidad de vida y un entorno urbano más saludable. Los índices del nivel de servicio en las paradas como una estrategia clave para mejorar la eficiencia y la calidad de los servicios de transporte público. A medida que las ciudades enfrentan desafíos de movilidad cada vez mayores, es crucial implementar medidas que prioricen el transporte público y brinden un sistema de transporte más accesible, rápido y confiable para los ciudadanos [3].

2. Marco Teórico

Los sistemas de transporte en América Latina han experimentado un período de cambio en los últimos 40 años, dando como resultado la necesidad del sistema del transporte público urbano y la implementación del sistema de transporte rápido tipo BRT. El sistema BRT es considerado como una solución de bajo costo para mejorar el transporte público en ciudades de América Latina y en todo el mundo [1].

Así, el sistema BRT es visto como una opción atractiva para las ciudades Latinoamericanas siendo más económicas. Estos medios de trasporte son caracterizados por ser fáciles de construir y accesibles; estos servicios son distinguidos

por su exclusividad en el uso de los carriles permitiendo su eficiencia en el tiempo de servicio, como resultado tiene un sistema de pago rápido y eficiente [4].

La calidad de servicio se puede definir como el cumplimiento o la evaluación realizada por el usuario que recurre a estos servicios. De igual manera, se considera que el establecimiento y la satisfacción de las experiencias que el usuario recibe a diario en el uso de estos medios permiten la evaluación para calificar sus servicios [5].

El primer estudio se enfoca en el desempeño del nivel de servicio que presta un factor o elemento determinado, pero desde la expectativa del conductor se identifican nueve factores que son: tiempo de recorrido, impacto al tránsito, disponibilidad, seguridad, capacidad, mantenimiento, construcción, aspecto económico y la prestación del servicio [6].

El segundo estudio se enfoca en medir subjetivamente a la satisfacción mediante el usuario en los servicios ofertados y deseados. En los cuales se toman en cuenta hasta 46 criterios, los cuales destacan la fiabilidad, responsabilidad, competencia, acceso, cortesía, comunicación, credibilidad y los elementos de transporte [7].

El tercer estudio, se aplicó en Suecia donde utilizaron modelos multivariados para estimar los efectos de la calidad del transporte público antes y después del cambio del modo de viajar, de forma pública o privada con la finalidad de analizar la teoría microeconómica del consumidor [8]. Por lo tanto, proporcionar un servicio cómodo y de alta calidad es fundamental para mejorar la percepción pública del transporte público y aumentar la satisfacción de los clientes.

2.1. Factores y variables que influencian el uso de la parada

Diversos estudios han identificado metodologías para evaluar la seguridad, la protección, la accesibilidad y el nivel de comodidad en las paradas de los autobuses, por ende, deben diseñarse cuidadosamente para garantizar la máxima seguridad a todos los usuarios de estos medios. Asimismo, una encuesta realizada utiliza el análisis Importancia-Satisfacción, combinando dos puntuaciones, para determinar qué atributos son considerados más importantes por los pasajeros y cuáles necesitan mejoras en una parada [9].

El factor principal que influye en la satisfacción del usuario con una parada o estación de transporte es un servicio frecuente y confiable, así como un ambiente seguro. Las características físicas de la parada o estación tienen un impacto indirecto en la satisfacción del usuario [10]. Además, se observó que, al controlar otros factores, los gestores de transporte tienden a sobrevalorar la importancia de la limpieza de las estaciones y la disponibilidad de información sobre horarios para los usuarios. Zhang [11] propone diversos tipos de comodidad como el térmica, acústico y visual que ayuda a un mejor entendimiento para un estudio más completo.

En la encuesta elaborada por Taylor [12] se compararon las opiniones de los gestores de transporte. Se encontró que los gestores acertaron al considerar que la seguridad y la protección eran aspectos muy importantes para los usuarios. Sin embargo, tendieron a subestimar la importancia de factores específicos relacionados con la seguridad, como la presencia de guardias de seguridad y la asistencia en caso de emergencia [9]. Basándose en el estudio de Taylor [12] se ha establecido una estructura sencilla que representa las distintas cargas de transbordo que los usuarios experimentan, exhibida en la Figura 1.



Figura 1: Jerarquía de necesidades de espera-transbordo de pasajeros [9].

Por otro lado, la ausencia de área de espera como la de instalaciones en la acera, presencia de vendedores ambulantes. Son algunos de los factores que pueden contribuir a un acto inseguro. Debido a esto, el papel de los actos inseguros es crucial para evaluar el nivel de seguridad de las paradas de autobús, y es necesario identificar los posibles actos inseguros y sus factores causales para evaluar el nivel de seguridad de las paradas de autobús. De la misma manera,

datos recientes destacan que una proporción significativa de lesiones graves ocurren al subir y bajar de los autobuses y no están directamente asociados con la colisión entre peatones y vehículos.

De esta forma, tanto la percepción de la experiencia al hacer transbordos en el transporte público como la probabilidad de usar nuevamente en el futuro pueden ser afectados por la ubicación, el diseño y la información ofrecida en las paradas y estaciones de transbordo. Además, estos aspectos también tienen un impacto significativo en la duración real del recorrido y el tiempo de espera, que influyen en la decisión de utilizar el transporte público en ocasiones posteriores [9].

Se considera cuatro índices principales que apoyan a la contribución global de cada parada de autobús que son los índices de seguridad, infraestructura-servicio y accesibilidad [13]. El concepto de accesibilidad se amplía con la incorporación de factores cualitativos, como la facilidad de desplazamiento y las características relacionadas con la accesibilidad, además del concepto tradicional de distancia a pie. Hansen [14] lo define como la «intensidad de la posibilidad de interacción», mientras que Lynch [15] añade las dimensiones de diversidad, equidad y control sobre el espacio. Engwicht [16] y Grava [17] postulan que la accesibilidad depende de la facilidad de acceso a las oportunidades, y hacen hincapié en que los entornos hostiles o inseguros actúan como un impedimento para el progreso. Estudios recientes [16, 17] han modelado la accesibilidad utilizando indicadores mixtos (seguridad, comodidad), pero estos estudios han subestimado el papel del entorno inmediato. El concepto de desigualdad en el diseño surge cuando no se tienen en cuenta las diversas necesidades (por ejemplo, las personas mayores que pueden tolerar caminar, pero no esperar de pie sin asientos), lo que conduce a una exacerbación de la exclusión.

La seguridad es muy importante y pretende evaluar el nivel de protección frente a un hecho perjudicial para el usuario del sistema de transporte público. Sin embargo, se ve afectada por la iluminación, ubicación de la parada, la visibilidad [18]. El índice de instalaciones-servicios en las paradas se relaciona con el grado de satisfacción que las personas experimentan al esperar en una parada de transporte público. Su propósito es establecer un ambiente placentero para los pasajeros, proporcionándoles una experiencia agradable durante la espera del transporte público [11].

Encuestas realizadas a los usuarios de las paradas de autobús muestran que las instalaciones-servicios está determinada principalmente por el ambiente [19]. En zonas de calor o frio extremo, es fundamental que el diseñador tenga en cuenta un nivel de sensibilidad radiante, a su vez, es importante considerar la ventilación del sitio, el albedo de los materiales utilizados ya que afectan el ambiente térmico general [20].

3. Metodología

La metodología del presente estudio consistió en varias etapas según lo descrito en la figura 2. En primer lugar, se realizó el análisis de la problemática de las preferencias de los usuarios en las estaciones de paradas de transporte. En segundo lugar, se determinó la metodología para la representación de las variables que influyen en la representación de los servicios en las paradas de transporte por medio de la grabación de extractos audiovisuales en paradas de autobús de varios distritos de Quito. En tercer lugar, se procedió con la recolección de información en campo que consistió en medir y recopilar la información en cada ubicación de las paradas de transporte público seleccionado. Posteriormente, dos miembros del grupo de investigación seleccionaron dieciséis ubicaciones con el objetivo de garantizar la coherencia con el experimento. Se aplicó una encuesta para poder recopilar las preferencias de servicios de transporte público en paradas tomando como población a las estudiantes y personal administrativo Universitario de la cuidad de Quito. Al final se procesó toda la información y se procedió con la redacción de los resultados y las conclusiones.

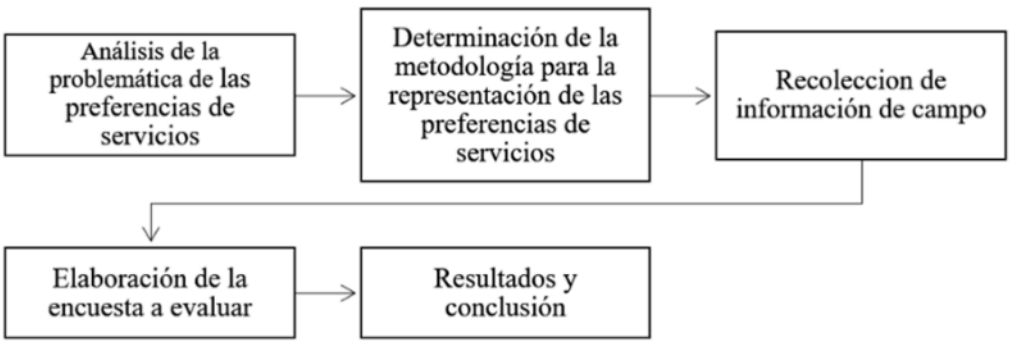


Figura 2: Diagrama de flujo metodológica

3.1. Descripción de indicadores y método de medición

Para llevar a cabo la evaluación de la preferencia de transporte público en paradas, es primordial identificar los elementos y variables de mayor relevancia para los peatones y usuarios del sistema de transporte público de una ruta determinada. En este escenario, se tendrán en cuenta los índices de accesibilidad, comodidad y seguridad que impacten a los usuarios sin dificultad en su movilidad y usuarios con limitaciones en su movilidad. Los índices y variables identificados en la Tabla 1. La medición de la preferencia de transporte público en paradas mediante el método de ranking implica a los usuarios que clasifiquen las variables según su orden de preferencia.

Tabla 1: Descripción de indicadores de medición de variables

Índices de estudio	**Accesibilidad**	**Comodidad**	**Seguridad**
Variables relacionadas	Tamaño Torniquetes Señalética de advertencia Alarma de desembarque Rampas de acceso de discapacidad Señalética informativa paradas Semáforo de salida Señalética peatonal Alarma de desembarque Puerta ingreso transporte Pantalla de información Boletería	Visera Apoyos isquiáticos (2m c/u) Banco Paredes de vidrio Wifi Basurero Protección rayos UV en entradas Dispensador de alcohol Limpieza paredes de vidrio Limpieza pisos Carteles de publicidad	Iluminación (lámparas fluorescentes) Luz de emergencia Guardia Cámara de seguridad Botón del pánico

3.2. Diseño del cuestionario

Se desarrolló un cuestionario estructurado mostrado en la Tabla 2 que contiene preguntas donde los usuarios clasificaron según las preferencias de los servicios que se ofrecen en las paradas. Las afirmaciones asociadas a cada indicador perceptivo se obtuvieron a partir de una exhaustiva revisión bibliográfica, tal y como se ilustra en la Tabla 2. El cuestionario se dividirá en varias secciones, que incluirán preguntas sobre la accesibilidad, la seguridad, y la comodidad como se muestra a continuación. La medición de los indicadores se realizó utilizando una escala Likert de 5 puntos, que iba de 1 (totalmente en desacuerdo) a 5 (totalmente de acuerdo). La encuesta aplicada incorporaba un cuestionario diseñado para obtener datos relativos a las características sociodemográficas y la ubicación geográfica.

Tabla 2: Descripción de preguntas y criterios aplicados

Preguntas	**Criterios**
¿Las señaléticas son de gran importancia en las paradas?	Accesibilidad
¿Es fácil obtener información sobre horarios y rutas en las paradas/estaciones?	
¿Es fácil encontrar mi parada o plataforma?	
¿Es fácil desplazarse por esta parada/estación?	
¿Suelo esperar poco para coger el autobús o el trole?	
¿Mi autobús/tren suele llegar puntual?	
¿Existen pisos antideslizantes en las paradas?	
¿Existen rampas de ingreso para personas con discapacidad?	
¿Me siento seguro aquí durante el día?	Seguridad
¿Me siento seguro aquí durante la noche?	
¿Hay una forma de obtener ayuda (botón de pánico) en caso de emergencia?	
¿Ésta parada/estación está bien iluminada por la noche?	
¿Tener guardias de seguridad aquí me hace sentir más seguro?	
¿Tener cámaras de seguridad aquí me hace sentir más seguro?	

4. Resultados

Los resultados se muestran en varias secciones que detallan la interpretación de la información recopilada. Al final se detallan los principales hallazgos sobre la situación y relaciones de las variables que influyen en la configuración de las estaciones de la parada desde el punto de vista perceptual de los usuarios.

4.1. Características sociodemográficas encuestados

La Tabla 3 muestra la información sociodemográfica de los encuestados. El perfil de los individuos requerido para la realización de la encuesta correspondía a jefes de Hogar con la capacidad de distinguir los costos de arrendamientos de inmuebles ubicados en el norte, centro y sur del DMQ. La mayoría tuvo un alto nivel de formación, lo que facilitó el uso de las herramientas digitales utilizadas en el estudio.

Tabla 3: Información sociodemográfica (N=543)

Variable	Total	Variable	Total
Edad		**Educación**	
26 - 35	225 (41 %)	No especificada	3 (0.6 %)
36 - 45	132 (24 %)	Secundaria	116 (21.4 %)
46 - 55	108 (20 %)	Técnico	67 (12.3 %)
56 - 65	61 (12 %)	Profesional	276 (50.8 %)
65 - 70	17 (3 %)	Maestría	59 (10.9 %)
		Doctoral	22 (4.1 %)
Género		**Deficiencia**	
Hombres	259 (47 %)	Auditiva:	
Mujeres	284 (53 %)	Desconocido	9 %
		Ninguno	89 %
		Uso audífonos	3 %
		Visual:	
		Desconocido	4 %
		Ninguno	60 %
		Uso lentes	36 %

4.2. Interpretación de los indicadores de medición

En la Figura 3, muestra la gráfica de barras en donde se constatan las preferencias de servicios para el factor accesibilidad, se toma en cuenta las variables relacionadas con el tamaño de la parada, espacios amplios para caminar, puntos de pago, semáforos y puertas de embarque/desembarque. Del total de los encuestados, los participantes puntúan como primordial la variable espacios amplios dentro de la parada con el 25 %, seguido de la variable tamaño de parada con el 24 %, la variable semáforo con el 23 % observando así, que estas 3 variables tienen un valor porcentual similar asumiendo que son de gran importancia y de preferencia para los usuarios del transporte público. Por el contrario, las variables puntos de pago y puertas de embarque y desembarque cuentan con resultados del 16 % y 12 % respectivamente, donde se observa que no obtuvieron mayor preferencia.

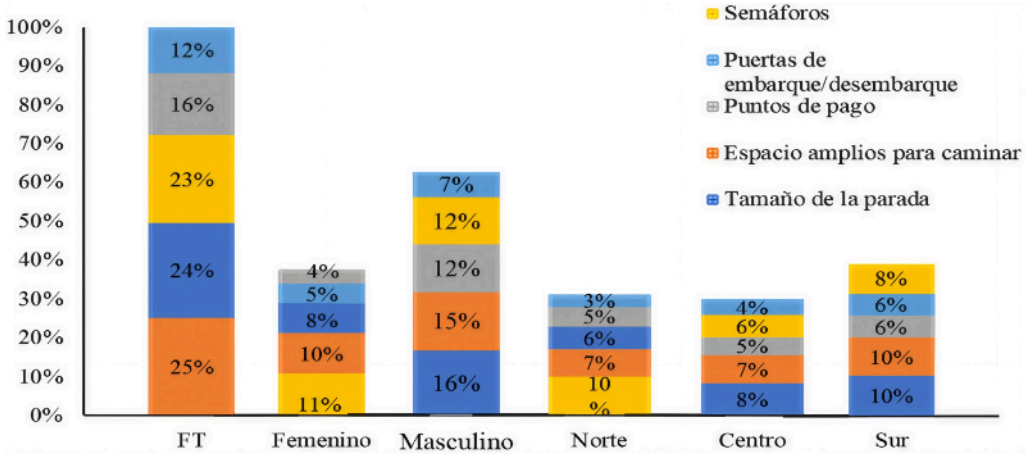


Figura 3: Análisis de indicadores accesibilidad

A continuación, en la Figura 4 se presenta la gráfica de barras que compara las preferencias de los usuarios seg ún la información sociodemográfica y de ubicación residencial para el factor seguridad, con las variables relacionadas a cámaras de seguridad, botón de pánico, guardia de seguridad, iluminación y unidades policiales.

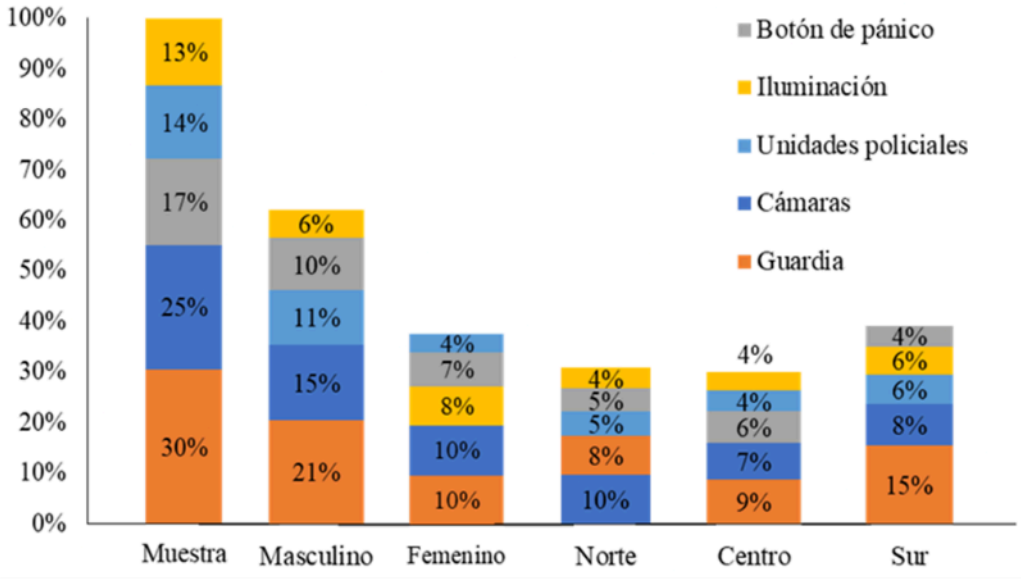


Figura 4: Análisis de indicadores seguridad

En los resultados totales obtenidos del factor seguridad, la variable que resalto fue guardia de seguridad con un total del 30 %, en relación de la variable cámaras de seguridad con el 25 %, siendo estas dos variables de mayor preferencia. Las variables botón de pánico y unidades policiales cerca con el 17 % y 14 % respectivamente, y por último la variable iluminación con el 13 %.

No obstante, estos resultados cambian si el análisis se lo realiza por cada una de las características sociodemográficas y de ubicación residencial, como se observa los datos, para las personas que viven en la parte norte se denota una mayor preferencia a la variable cámara de seguridad con el 10 % a diferencia de la variable guardia de seguridad con el 8 % debido al índice delictivo bajo.

4.3. Caracterización de los principales indicadores de medición

La resume las respuestas a los indicadores perceptuales descritos en la Figura 5. Los promedios de los indicadores relacionados con la accesibilidad siendo (I1), fácil desplazamiento (I2), fácil acceso (I3) y tamaño (I4). Los valores medios para los indicadores de seguridad, tales como ausencia de robos (I4), seguridad interna (I5) y accidentes de tráfico (I6).

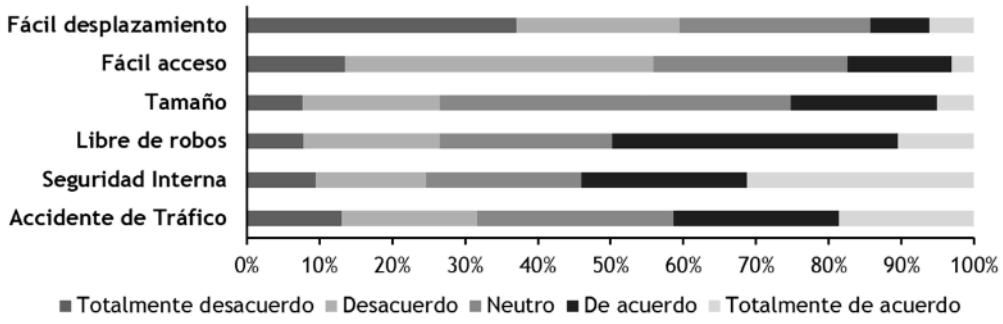


Figura 5: Análisis de indicadores de percepción

4.4. Modelo de factores exploratorio

Se elaboró un modelo de análisis exploratorio de factores utilizando la técnica estadística multivariante que permite reducir la dimensionalidad de un conjunto de variables observadas identificando una estructura subyacente de factores latentes no directamente medibles. El conjunto de indicadores que se incluyó en el análisis exploratorio corresponde a los detallados en el cuestionario perceptual (ver Tabla 2) y luego validados y reducidos según las respuestas obtenidas de los encuestados (ver Figura 5 y Figura 6).

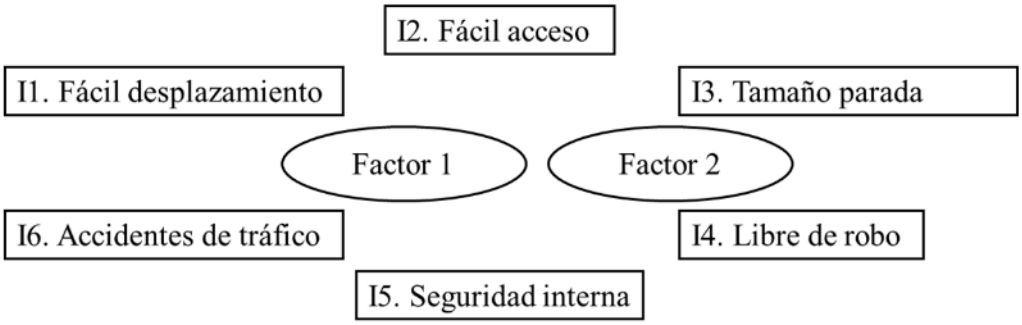


Figura 6: Indicadores validados

Se llevó a cabo con el objetivo de extractar los factores principales para cada variable latente. Se utilizó una rotación varimax para analizar los componentes principales y, de ese modo, definir los factores ortogonales. El análisis de factores exploratorios se procesaron y analizaron utilizando la librería Lavaan [21] en R-Studio [22]. Finalmente, el modelo de factores exploratorio facilitó el uso de un análisis de mediación para la estimación de las relaciones de los factores latentes con los distintos indicadores. Se utilizaron los criterios de adecuación de la muestra para verificar los resultados, en particular el índice de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO = 0.62) [23] y la medida de adecuación de la muestra (MSA) para cada indicador. Se consideraron aceptables los valores superiores a 0.4. Como se muestra en la Tabla 4, se identificaron un total de dos factores que cumplían el criterio de un valor propio superior a uno. Estos factores representaban el 82.3 % de la varianza total, con cargas que oscilaban entre 0.41 y 0.85. El factor 1 representaba la accesibilidad de la parada de autobús y explicaba el 37.1 % de las varianzas.

Tabla 4: Análisis Exploratorio de Factores

Indicadores	**MSA**	**Factor de Carga**	**Varianza explicada (%)**
Factor 1: Accesibilidad			37.1
I1. Fácil desplazamiento	0.59	0.70	
I2. Fácil acceso	0.58	0.80	
I3. Tamaño parado	0.70	0.41	
Factor 2: Seguridad			45.2
I4. Libre de robo	0.56	0.71	
I5. Seguridad Interna	0.55	0.85	
I6. Accidentes de tráfico	0.77	0.44	

Estadísticamente el modelo de factores exploratorios modela la covarianza entre las variables, representada mediante cargas factoriales que indican la correlación de cada variable con cada factor, y calcula comunalidades que expresan la proporción de varianza de cada variable explicada por los factores comunes. Dicha carga factorial de cada indicador se muestra en la Figura 7. El primer grupo de indicadores I1. Fácil desplazamiento, I2. Fácil acceso e I3. Tamaño de la parada tienen una adecuada correlación para formar el Factor 1 de accesibilidad. Por otro lado, la asociación de los indicadores I4. Libre de robo, I5. Seguridad interna e I6. Accidentes de tráfico permitieron descubrir la correlación del Factor 2 identificado como Seguridad.

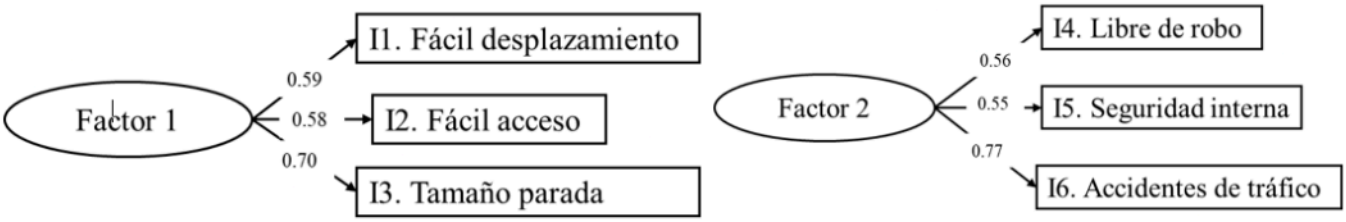


Figura 7: Indicadores validados

5. Conclusiones y trabajos futuros

Esta investigación integra una técnica de encuesta innovadora que se contextualiza las características cualitativas de las paradas de autobús. Se seleccionaron un total de catorce escenarios para su análisis, y el proceso de selección se basó en un experimento concebido para configurar un conjunto de atributos de accesibilidad y seguridad en distintos niveles. Este enfoque proporciona a los participantes la flexibilidad necesaria para evaluar las variables en condiciones callejeras con un nivel de detalle satisfactorio.

Los resultados de la encuesta sugieren que los operadores de transporte valoran más los atributos orientados al usuario, como la comodidad física y el transbordo fluido. Esto puede deberse a la inmediatez y constancia de los factores relacionados con el usuario, como la provisión de paradas y estaciones de transbordo limpias y cómodas, mientras que los atributos no relacionados con el usuario, como el desarrollo conjunto, suelen darse con poca frecuencia.

Los resultados de nuestra encuesta muestran que, aunque los operadores de transporte parecen tener un conocimiento bastante preciso de los atributos que son importantes para sus usuarios en las paradas de transporte y las estaciones de transbordo, existen varios puntos de disparidad. Mientras que los operadores asumían correctamente que la seguridad y la protección eran muy importantes para los usuarios, tendían a subestimar la importancia de servicios específicos relacionados con la seguridad, como la presencia de guardias de seguridad y asistencia en caso de emergencia. También parece que, controlando otros factores, los operadores sobrestiman la importancia de la limpieza de las estaciones y de la información sobre horarios para sus usuarios.

En cuanto al análisis del modelo exploratorio de factores, la estimación del efecto demuestra una correlación entre la accesibilidad y la percepción de la seguridad en la mayoría de los indicadores. La percepción de la accesibilidad y la seguridad varía entre los usuarios, siendo la ubicación de su vivienda la principal variable explicativa. Estos hallazgos complementan la comprensión de las complejas relaciones descritas en la literatura entre las construcciones latentes.

El determinante más importante de la satisfacción del usuario con una parada o estación de tránsito es un servicio frecuente y fiable en un entorno de seguridad personal, y sólo indirectamente las características físicas de dicha parada o estación. La mayoría de los usuarios del transporte público preferirían esperas cortas y predecibles para los autobuses y trenes en un entorno seguro, aunque sencillo o incluso lúgubre, antes que largas esperas para los vehículos que llegan tarde. Esto es cierto incluso si esas largas esperas se producen en las estaciones de tránsito más elaboradas y atractivas, y especialmente si los usuarios temen por su seguridad. Aunque esta conclusión no sorprenderá a quienes estén familiarizados con las investigaciones anteriores sobre las percepciones de los usuarios del transporte público, presenta un contraste con gran parte de la investigación descriptiva y centrada en el diseño de las paradas y estaciones de transporte público.

Referencias

[1] A. Yoh, H. Iseki, M. Smart, and B. D. Taylor, "Hate to wait: Effects of wait time on public transit travelers' perceptions," *Transportation Research Record*, no. 2216, pp. 116–124, 12 2011.

[2] K. Lättman, M. Friman, and L. E. Olsson, "Perceived accessibility of public transport as a potential indicator of social inclusion," *Social Inclusion*, vol. 4, no. 3, pp. 36–45, 2016.

[3] IADB, *Evolución de los Sistemas de Transporte Urbano en América Latina.* Bid, 2017, vol. 0, no. 0.

[4] R. Perez and W. Osal, "Impacto de los sistemas de transporte público latinoamericanos en la movilidad urbana y en el ambiente," in *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, vol. 13, no. 2. Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre, 2019, pp. 38–53.

[5] R. Skinner, *A handbook for measuring customer satisfaction and service quality.* Washington D.C.: National Academy Press, 1999.

[6] S. Sun, D. Fang, and J. Cao, "Exploring the asymmetric influences of stop attributes on rider satisfaction with bus stops," *Travel behaviour and society*, vol. 19, pp. 162–169, 4 2020.

[7] B. Taylor, D. Miller, H. Iseki, and C. Fink, "Nature and/or nurture? analyzing the determinants of transit ridership across us urbanized areas," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 43, no. 1, pp. 60–77, 2009.

[8] S. Roy and D. Basu, "An evaluation of in-service infrastructural facilities of walk-access feeder paths to urban local bus stops," *Transportation Research Procedia*, vol. 48, no. 2019, pp. 3824–3831, 2020.

[9] M. Smart, "Thinking outside the bus: Understanding user perceptions of waiting and transferring in order to increase transit use final report," Tech. Rep., 2007. [Online]. Available: www.its.ucla.edu

[10] D. Brian and N. Camille, "Factores que influyen en el número de usuarios del transporte público: Revisión y análisis de la bibliografía sobre frecuentación del transporte público," UC Berkeley, Tech. Rep., 2003.

[11] E. Paredes and A. Berbey Álvarez, "Situación actual del sistema de transporte en la ciudad de quito, ecuador: una propuesta de mejora," *TRIM. Tordesillas, revista de investigación multidisciplinar*, no. 16, pp. 5–40, 7 2019.

[12] B. Taylor, H. Iseki, M. A. Miller, and M. Smart, *Thinking outside the Bus: Understanding user perceptions of waiting and transferring in order to increase transit use.* Los Angeles, CA: UCLA Institute of Transportation Studies, 2013, vol. 54, no. 7.

[13] F. López, *La Accesibilidad percibida: responden los usuarios.* ACCEPLAN, 2001.

[14] W. G. Hansen, "How accessibility shapes land use," *Journal of the American Planning Association*, vol. 25, no. 2, pp. 73–76, 1959.

[15] K. Lynch, *The Image of The City.* Cambridge: The MIT Press, 1959, vol. 11. [Online]. Available: https://mitpress.mit.edu/books/image-city

[16] D. Engwicht, *Reclaiming Our Cities and Towns: Better Living With Less Traffic.* Philadelphia: New Society Publishers, 1992.

[17] S. Grava, *Urban Transportation Systems.* New York: McGraw-Hill, 2003.

[18] J. Volpe, "Security and emergency preparedness," Tech. Rep., 2003.

[19] R. Imam, "Measuring public transport satisfaction from user surveys," *International Journal of Business and Management*, vol. 9, no. 6, pp. 106–114, 2014.

[20] H. K. Suman, Nomesh, B. Bolia, and G. Tiwari, "Analysis of the factors influencing the use of public buses in delhi," 2016.

[21] Y. Rosseel, "Lavaan: an r package for structural equation modeling," *Journal of Statistical Software*, vol. 48, no. 2, 2012.

[22] R Core Team, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, R Foundation for Statistical Computing, 2021, accessed: Aug. 03, 2021. [Online]. Available: https://www.r-project.org/

[23] B. A. Cerny and H. F. Kaiser, "A study of a measure of sampling adequacy for factor-analytic correlation matrices," *Multivariate Behavioral Research*, vol. 12, pp. 43–47, 1977.

[24] J. Ding, Y. Zhang, and L. Li, "Accessibility measure of bus transit networks," *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 12, no. 7, pp. 682–688, 2018.

[25] K. Zhang, "Bus stop urban design," Tech. Rep., 2012.

IDEAS

Innovation & Development in Engineering and Applied Science

Journal homepage: https://revistasojs.utn.edu.ec/index.php/ideas

Mobile App implementation with e-invoicing to optimize e-commerce in retail SMEs

Implementación de una aplicación móvil con facturación electrónica para optimizar el comercio electrónico en las PYMES del sector minorista.

Luis Fernando Palacios Ochoa[a], Diego Javier Trejo España[a]

[a] Universidad Técnica del Norte, Av. 17 de Julio, CP 100105, Ibarra, Ecuador

Enviado: 18/07/2025, Recibido: 23/01/2026, Publicado: 30/01/2026
Autor de correspondencia:
Luis Palacios: lfpalacioso@utn.edu.ec
DOI: 10.53358/ideas.v8i1.1313

KEYWORDS

Mobile apps,
SMEs,
information systems,
E-Invoicing,
E-commerce retailing.

ABSTRACT

Retail SMEs in developing markets often face significant operational inefficiencies due to reliance on manual processing. This research addresses the critical problem of excessive transaction times (over 30 minutes) and the lack of automated fiscal compliance at "Men's Locker Clothing Ec," a retail store in Ecuador. A descriptive-constructive methodology was applied using the Mobile-D agile framework to design and deploy a cross-platform mobile application with electronic invoicing (Flutter + Firebase). The evaluation followed a mixed-methods approach with 81 users. Results demonstrate a high level of user satisfaction, supporting the Technology Acceptance Model (TAM): 97.5 % of users affirmed brand identity consistency, and 96.3 % found the app easy and intuitive to use. Crucially, the application improved operational efficiency by reducing the average total purchasing workflow time by 74.07 %, shifting from over 30 minutes in the traditional physical process to 15–20 minutes in the digital session. This study validates that lightweight agile methodologies and serverless architectures are effective strategies for modernizing retail SMEs.

PALABRAS CLAVE

Aplicaciones móviles,
PYME,
comercio minorista electrónico,
facturación electrónica,
sistemas de información.

RESUMEN

Las PYMES minoristas en mercados en desarrollo a menudo enfrentan ineficiencias operativas significativas debido a la dependencia del procesamiento manual. Esta investigación aborda el problema crítico de los tiempos de transacción excesivos (más de 30 minutos) y la falta de cumplimiento fiscal automatizado en "Men's Locker Clothing Ec," una tienda minorista en Ecuador. Se aplicó una metodología descriptiva-constructiva utilizando el marco ágil Mobile-D para diseñar y desplegar una aplicación móvil multiplataforma con facturación electrónica (Flutter + Firebase). La evaluación siguió un enfoque de métodos mixtos con 81 usuarios. Los resultados demuestran un alto nivel de satisfacción del usuario, respaldando el Modelo de Aceptación Tecnológica (TAM): el 97.5 % de los usuarios afirmaron la consistencia de la identidad de marca, y el 96.3 % encontró la aplicación fácil e intuitiva de usar. Crucialmente, la aplicación mejoró la eficiencia operativa al reducir el tiempo promedio total del flujo de trabajo de compra en un 74.07 %, pasando de más de 30 minutos en el proceso físico tradicional a 15–20 minutos en la sesión digital. Este estudio valida que las metodologías ágiles ligeras y las arquitecturas sin servidor son estrategias efectivas para modernizar las PYMES minoristas.

1. Introduction

In the current digital era, technology has become a fundamental pillar of daily life, driving global interconnectedness and progress across various sectors, including business. Companies worldwide, specifically in Ecuador, have adopted technological tools to broaden their impact, enhance efficiency, and meet the demands of an increasingly competitive market [1].

At the local level, the significant acceleration of digital adoption and e-commerce in Ecuador has prompted Small and Medium-sized Enterprises (SMEs) to seek innovative solutions to remain competitive and expand their market presence. Digitalization has become a critical strategy for local companies to overcome geographical barriers, foster customer loyalty, and adapt to evolving consumer dynamics and expectations in the national market.

In this context, "Men's Locker Clothing Ec," a clothing store in Ibarra, Ecuador, faces significant challenges hindering its vision of national expansion. These obstacles include a limited online presence, which restricts its reach and fails to capitalize on e-commerce opportunities, given that 70 % of consumers prefer online shopping for convenience and accessibility [2]. Additionally, the store struggles with order and shipping management due to the lack of an integrated system to optimize inventory and deliveries [3]. Insufficient customer information prevents personalized product and service offerings, which are crucial in a competitive market [4]. Finally, the challenge of competing with established major brands, which possess advanced technological infrastructure and a strong digital presence [5], underscores the need for an innovative solution. Collectively, these issues constrain the store's growth and limit its adaptability to modern market demands, where digitalization and e-commerce are essential for business success.

Faced with these challenges, implementing a technological solution becomes imperative [6]. This research proposes the development of a mobile application with e-commerce and electronic invoicing functionalities for "Men's Locker Clothing Ec." This tool aims to transform the business model by enhancing customer experience, optimizing internal processes, increasing brand visibility, and providing valuable data for decision-making.

Digital innovation is a key driver of business growth; adopting digital technologies significantly increases the likelihood of SME expansion and competitiveness [7]. Ecommerce has proven to be a powerful tool, evidenced by the exponential growth in online sales—exemplified by a 36.7 % increase in Latin America in 2020 [8]. A robust digital presence is pivotal, given that 75 % of consumers prefer online purchasing channels [9]. Furthermore, process automation, such as electronic invoicing, can reduce operational costs by up to 30 % and increase productivity by 20 % [10]. Consequently, this application aims to resolve the store's current operational challenges and position it as a competitive brand within the national market.

Related Works and Innovation Recent studies highlight that operational efficiency is the primary driver for SME survival in turbulent markets. For instance, research from 2024 indicates that predictive tools and digital integration are vital for reducing operational costs in modern businesses [11]. In Latin America, e-commerce adoption grew significantly in 2024, yet many SMEs struggle with the technical complexity of implementation [12]. This study differentiates itself by applying a "right-sized" engineering approach: instead of complex enterprise architectures, it demonstrates how a serverless monolithic architecture combined with the Mobile-D framework offers a viable, low-cost digitalization path for micro-retailers. This approach specifically resolves inefficiencies such as manual invoicing delays and physical checkout bottlenecks, offering a replicable model for similar emerging markets.

The general objective of this study is to implement a mobile e-commerce application integrated with electronic invoicing for the clothing retailer 'Men's Locker Clothing Ec.' To achieve this, a robust theoretical framework was established, the store's specific requirements were diagnosed, and the application was developed and evaluated to optimize the online purchasing workflow and enhance user experience. The development process adhered to an agile methodology (utilizing Flutter and Firebase), assessing its impact through real-world testing and the analysis of key metrics. This research seeks to validate the hypothesis that advanced technological integration improves commercial efficiency, drives customer acquisition, and significantly enhances customer satisfaction.

2. Methods

The study adopts a descriptive-constructive research design, characterized by the construction and subsequent validation of a tangible technological solution [13]. This methodological approach is particularly well-suited for research objectives centered on the creation and evaluation of a functional application to address a specific problem.

The research paradigm emphasizes the transition from theoretical conceptualization to a concrete, evaluable artifact. Consequently, this methodological choice underpins the quality and relevance of the final outcome, ensuring that both design and implementation remain adaptive to real-world needs and the iterative nature of software development.

This study aligns with a pragmatic paradigm, prioritizing practical utility and effective problem-solving through the integration of theory and technology. This paradigm combines quantitative and qualitative methods to achieve a holistic understanding of the phenomenon under study [14]. Consequently, the evaluation of the application's effectiveness required both objective quantitative metrics (e.g., purchase time, usability scores) and qualitative insights regarding user perceptions and experiences (e.g., feedback on ease of use).

"The research utilized an agile development approach, specifically the Mobile-D methodology, which is recognized for its orientation toward mobile application development [15]. Although newer agile frameworks exist, Mobile-D was strategically selected for its lightweight structure, rendering it ideal for small teams or solo developers where administrative overhead must be minimized. Furthermore, its iterative cycle structure synergizes effectively with Flutter's "Hot Reload" feature, enabling real-time validation of changes—a combination that significantly accelerates the production phase in SME contexts. This methodology is characterized by its emphasis on iteration, continuous feedback, and adaptability to evolving requirements. Concurrently, the application design prioritized Technology Acceptance Model (TAM) principles—ease of use and perceived utility—to ensure adoption by both customers and the retailer [16]. Additionally, the implementation of electronic invoicing ensures compliance with local regulations (SRI) [17] while optimizing internal processes. The chosen technologies, Flutter and Firebase, were selected for their scalability and capacity to integrate critical functionalities [18].

The Technology Acceptance Model (TAM) stands as one of the most widely utilized theoretical frameworks for explaining technology adoption. According to this model, perceived ease of use and perceived usefulness are the primary determinants influencing the behavioral intention to use a system. Within the context of e-commerce mobile applications, perceived ease of use refers to interface simplicity and efficiency. Conversely, perceived usefulness pertains to the tangible benefits derived by the user, such as time savings, access to promotions, and a personalized shopping experience.

The methodology entails the active manipulation of variables throughout its lifecycle. Through the application of the Mobile-D framework, the researcher systematically modifies software characteristics—such as design, features, and underlying technologies—based on defined requirements and objectives to optimize both user experience and operational efficiency. The iterations inherent to Mobile-D serve as critical checkpoints where these parameters are calibrated based on continuous feedback. Consequently, the research is direct and constructive in nature, culminating in the creation and iterative refinement of the mobile application to effectively address the research problem and fulfill the study's objectives.

The temporal dimension of the study was defined by the application of the MobileD methodology, which structures the process into distinct iterative phases. In contrast to linear research designs, agile frameworks such as Mobile-D operate through short, repetitive cycles known as iterations. Each iteration represented a discrete interval for both data collection (requirements elicitation, prototype feedback, test results) and technical intervention (development and refinement). Consequently, data collection remained continuous throughout the Mobile-D lifecycle, ensuring an adaptive and user-centered development process.

2.1. Population and Sample

The target and accessible populations were derived directly from the study's general objective: "To implement a mobile application with e-commerce electronic invoicing for the clothing retailer 'Men's Locker Clothing Ec'." The target population encompasses all current and potential customers of the retailer who utilize mobile devices and express interest in online shopping. For the specific purpose of usability evaluation, the accessible population—including store representatives—was defined as a select group of users with prior experience in mobile applications and digital commerce. These individuals were purposively selected based on their ability to provide qualified, high-level feedback regarding the application's functionality and usability.

Non-probabilistic convenience sampling was employed for the application evaluation phase. The sample comprised eighty-one (81) participants, selected for their familiarity with e-commerce environments and their roles as business representatives. The rationale for this sample size ($n = 81$) is grounded in the principles of Nielsen's Heuristic Evaluation, which posits that a focused group of evaluators is sufficient to identify the majority of usability issues. Consequently, the methodology prioritized the efficient detection of design flaws and functional validation over the broad statistical representativeness typically sought in large-scale population surveys.

The key participants involved in the development and evaluation lifecycle were defined as follows: the Developer (a role assumed by the researcher), the Store Manager, and the Expert Users. The Developer was responsible for the entire technical scope, encompassing conceptualization, architectural design, programming, implementation, and debugging. The Store Manager played a pivotal role during the Exploration phase and the definition of functional requirements. Finally, Expert Users participated in the System Testing phase, contributing specifically to the usability

evaluation employing Nielsen's Heuristic Method.

2.2. Materials, Equipment, and Software

The resources utilized for the development of the mobile application and its electronic invoicing module were categorized into field materials, laboratory materials, hardware equipment, and software tools. These resources were indispensable for the successful realization of the study's objectives, ensuring an efficient and scalable development process that remains compliant with local regulatory standards. Table 1 provides a comprehensive summary of the specific materials, equipment, and software employed.

Table 1: Materials, equipment, and software used in the research

Field materials	Laboratory materials	Equipment	Software
Functional and non-functional requirements of the store	Interface prototypes	Laptop computer	Flutter
SRI regulations	Test data for transaction simulation	Devices	Firebase
UX design guides	Electronic invoicing templates	Cloud server	Android Studio, Git/GitHub

The selection of Flutter and Firebase was driven not merely by technical performance criteria but also by strategic business considerations. Flutter was selected for its capability to compile native code for both iOS and Android platforms from a single codebase, thereby significantly reducing development and maintenance costs for SMEs [19]. It was prioritized over alternatives such as React Native or Xamarin due to its superior performance in applications requiring complex integrations—such as electronic invoicing—and its robust developer community [19]. Concurrently, Firebase was adopted as a comprehensive Backend-as-a-Service (BaaS) solution, handling user authentication, real-time data management (via Cloud Firestore), and serverless computing functions (e.g., automated invoice generation) [20]. Its robust infrastructure obviates the need for traditional server management, rendering it an ideal solution for small enterprises pursuing digital expansion without substantial initial capital expenditure. Furthermore, these services abstract complex functionalities while ensuring high standards of data security and availability [18].

2.3. Implementation Procedures and Data Collection

The research procedure was structured according to the defined phases of the Mobile-D framework: Exploration, Initialization, Production, Stabilization, and System Testing [21]. The implementation strategy was executed through 17 distinct iterations, as detailed in Table 2, enabling a highly adaptive and agile development lifecycle.

Table 2: Phase Planning (Mobile-D Iterations)

Phase	Iteration	Description
Exploration	Iteration 0	Project establishment, stakeholder groups, constraints, assumptions, and dependencies.
Initialization	Iteration 1	Initial requirements analysis.
	Iteration 2	User authentication
	Iteration 3	User registration
Production	Iteration 4	Purchase process
	Iteration 5	Purchase history
	Iteration 6	Product publishing
	Iteration 7	Electronic invoicing
	Iteration 8	User data modification
	Iteration 9	Shipping address editing
Stabilization	Iteration 10	Refactoring: Authentication
	Iteration 11	Refactoring: Registration
	Iteration 12	Refactoring: Purchase process
	Iteration 13	Refactoring: Product publishing
	Iteration 14	Refactoring: Invoicing
	Iteration 15	Refactoring: User data
	Iteration 16	Refactoring: Shipping address
	Iteration 17	Refactoring: Purchase history
System Testing	Iteration 18	Test evaluation and results analysis

Phase Details:

- **Exploration Phase (Iteration 0):** The initial phase focused on the elicitation of application requirements through the active collaboration of key stakeholders: the developer, the store manager, and the end-users. A comprehensive data collection process was employed, utilizing semi-structured interviews and participant observation to precisely define the system's scope. This process led to the formal identification of functional (Table 3) and non-functional (Table 4) requirements. Key functional modules included user authentication, electronic invoicing integration, shopping cart management, promotional systems, profile management, and real-time order tracking. Conversely, non-functional requirements specified technical constraints, including the use of the Flutter framework, cross-platform compatibility (Android and iOS with a Web administration panel), specific UI/UX standards, a serverless database topology (Firebase), and Spanish language localization.

Table 3: Functional Requirements

Id	Requirement	Description	Priority
RF1	User Authentication	The user must authenticate with their email and password to access the store's main menu when accessing the mobile application.	High
RF2	User Registration	The mobile application allows users without an account to register by filling out the form or quickly logging in with their Google account.	High
RF3	Electronic Invoice	The user will receive an electronic invoice sent to their email after completing a transaction.	High
RF4	Shopping Cart	Once authenticated, users can purchase products, add/remove items, and select a payment method and shipping address.	Medium
RF5	Promotions Publication	The user can view the store's discounts directly from their mobile device.	Medium
RF6	User Information Update	The user can update their personal information for invoice or shipping address changes.	Medium
RF7	View Purchase Status	The user can check purchase status in the user profile menu under "My Orders".	Medium

Table 4: Non-Functional Requirements

Id	Requirement	Description	Priority
RNF1	Development Language	The mobile application was developed using the Flutter framework.	High
RNF2	Platforms	The mobile application operates on a cloud-based architecture (Firebase), utilizing public Internet connectivity (4G/LTE or Wi-Fi) rather than a local intranet. For the purpose of this study, a pilot prototype was validated with the selected sample users.	High
RNF3	Interface	The mobile application will have an easy and interactive interface for enhanced user ease of use.	High
RNF4	Database Topology	The database used was Firebase Database to store the application's information.	High
RNF5	Language	The application's default language will be Spanish.	High

Initialization Phase (Iteration 1): This phase encompassed the technical configuration of the development environment, integrating Android Studio, the Flutter framework, and the Dart SDK, alongside the necessary technical training for the development team. Furthermore, the project's operational constraints and scope were formally defined. These included mandatory prerequisites such as continuous internet connectivity for real-time features and minimum operating system compatibility standards (Android Nougat 7.0+ and iOS 10+).

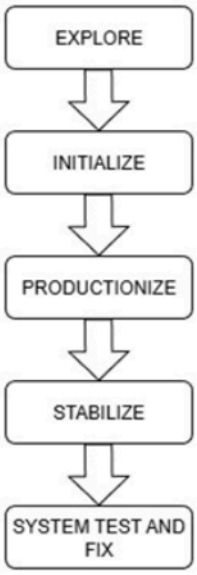


Figure 1: The Mobile-D Development Methodology, Source: [22]

- **Production Phase (Iterations 2-9):** This phase constituted the core development effort, characterized by the iterative implementation of critical system functionalities. Key modules developed during this stage included secure user authentication, the comprehensive purchasing workflow, order history visualization, product catalog management, electronic invoicing integration, and logistics updates regarding user profiles and shipping status. Consistent with the Mobile-D framework, each iteration involved the systematic refinement of Story Cards and user interfaces, culminating in rigorous acceptance testing to ensure adherence to defined functional specifications.
- **Stabilization Phase (Iterations 10-17):** This phase was dedicated to the technical consolidation of the application. It entailed extensive code refactoring to optimize execution performance and resource efficiency, ensuring the codebase remained maintainable. Concurrently, the final user interface (UI) designs were frozen to ensure visual consistency. The phase also involved rigorous, ongoing acceptance testing to validate the overall stability and reliability of the system prior to the final system testing.
- **System Testing Phase (Iteration 18):** The final stage of the development lifecycle focused on a rigorous evaluation employing Nielsen's Heuristic Method. Comprehensive testing protocols were executed to validate both the functional integrity and system stability of the application. This phase concluded with a detailed analysis of the collected data, forming the empirical basis for the study's final conclusions and recommendations.

The system architecture leveraged a scalable, serverless paradigm, utilizing a NoSQL database (Firebase) for data persistence [23]. This serverless approach was strategically prioritized over a distributed microservices architecture, adhering to the principles of appropriate engineering suitable for Small and Medium Enterprises (SMEs). While microservices offer granular scalability for large-scale enterprises, they introduce significant maintenance overhead and deployment complexity that are often operationally and financially unsustainable for a small retail business. The selected architecture utilizing Firebase provides automatic scaling capabilities and high availability, eliminating the overhead of traditional infrastructure management and thereby ensuring the economic viability of the solution for the retailer. Communication between the frontend and backend was established via a RESTful API protocol [24]. This decoupled design ensured efficient and secure data interaction while facilitating future maintenance and scalability. The cloud-native nature of Firebase guaranteed high availability and performance, as illustrated in the system architecture diagram in Figure 2.

The evaluation strategy centered on usability assessment employing Nielsen's Heuristic Evaluation. A cohort of eighty-one (81) evaluators systematically analyzed the application against Nielsen's ten established heuristics (e.g., Visibility of System Status, User Control and Freedom, and Consistency and Standards). The testing protocol encompassed critical operational workflows—specifically purchase execution, user registration, and electronic invoicing—to identify potential friction points. The resulting analysis isolated specific strengths and weaknesses within the UI/UX design, providing actionable insights for improvement. While this inspection method proved highly efficient in the early detection of design flaws, it is acknowledged that the findings may possess limited generalizability to broader, non-expert populations.

2.4. Data Analysis

The data analysis framework employed a mixed-methods approach, integrating quantitative and qualitative techniques to achieve a holistic understanding of the application's performance. Quantitative data—encompassing usability test results and performance metrics such as purchase completion time—were subjected to statistical analysis utilizing descriptive measures (mean, standard deviation) and Analysis of Variance (ANOVA) for group comparisons. Complementarily, qualitative data derived from interview responses and expert commentary underwent rigorous content and thematic analysis [25]. Table 4 provides a detailed overview of the parameters and statistical models applied to both data categories.

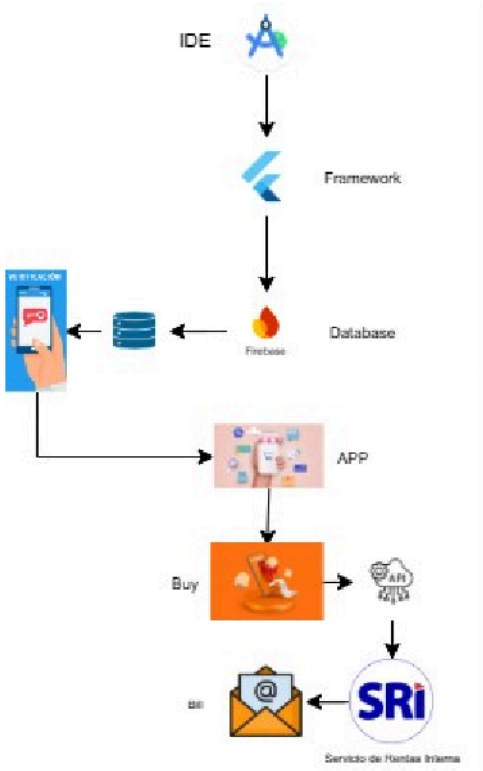


Figure 2: System Architecture, Original Authorship

2.5. Ethical Considerations

The research protocol strictly adhered to established ethical principles, prioritizing the protection of participants and the integrity of the collected data. The confidentiality of customer data was rigorously maintained through the anonymization of sensitive information—such as transaction history—utilizing non-traceable unique identifiers [26]. Furthermore, the study ensured full compliance with the Ecuadorian legal framework, specifically adhering to the Organic Law on Personal Data Protection (Ley Orgánica de Protección de Datos Personales) (National Directorate of Public Registries, 2025). From a technical perspective, data storage within Firebase is secured via AES-256 encryption, an industry-standard measure designed to mitigate risks of unauthorized access and ensure data sovereignty.

3. Results

This section presents the findings regarding the implementation and evaluation of the e-commerce mobile application for "Men's Locker Clothing Ec." The results were derived from the application of the Mobile-D development methodology and data collected via a survey of 81 participants.

3.1. Descriptive Analysis of the Usability Survey

A survey was administered to 81 participants to evaluate the mobile application's usability and user perception. Data analysis utilized descriptive statistics—specifically frequency, percentage, mean, median, mode, and standard deviation—for each survey item. Given the categorical and dichotomous nature of the primary variables (Yes/No responses), parametric normality tests (such as Shapiro-Wilk) were deemed inapplicable. Consequently, the analysis relied on descriptive statistics based on Relative Frequency formulas ($Freq\,\% = Nn \times 100$) to validate acceptance levels. Table 5 provides a detailed summary of the results.

Table 5: Survey Results on the Mobile Application

Question	Resp. Option	Freq. (%)	Descriptive Statistics
Q1. Main interface reflects store identity	YES	79 (97.5 %)	Mode: YES
	NO	2 (2.5 %)	
Q2. Application easy to use	YES	78 (96.3 %)	Mode: YES
	NO	3 (3.7 %)	
Q3. Efficient and intuitive design	YES	79 (97.5 %)	Mode: YES
	NO	2 (2.5 %)	
Q4. Consistent navigation across interfaces	YES	79 (97.5 %)	Mode: YES
	NO	2 (2.5 %)	
Q5. Users adapt quickly	YES	75 (92.6 %)	Mode: YES
	NO	6 (7.4 %)	
Q6. Would recommend to others	YES	79 (97.5 %)	Mode: YES
	NO	2 (2.5 %)	
Q7. Purchase time reduction	25 %	3 (3.7 %)	Mean: 74.07
	50 %	20 (24.7 %)	Median: 75
	75 %	35 (43.2 %)	Mode: 75
	100 %	23 (28.4 %)	SD: 20.58
Q8. Appropriate image/icon sizing	YES	79 (97.5 %)	Mode: YES
	NO	2 (2.5 %)	
Q9. Time WITHOUT application	15-20 min	15 (18.5 %)	Mode: 30+
	20-25 min	16 (19.8 %)	
	25-30 min	13 (16.0 %)	
	30+ min	37 (45.7 %)	
Q10. Time WITH application	15-20 min	55 (67.9 %)	Mode: 15-20
	20-25 min	23 (28.4 %)	
	25-30 min	3 (3.7 %)	
	30+ min	0 (0.0 %)	

Note: Responses from 81 participants about their experience with the mobile application.

3.2. Interpretation of Survey Results

The survey results obtained from 81 participants demonstrate a predominantly positive user perception of the mobile application:

- **Brand Identity and General Usability (Q1, Q2, Q3, Q5, Q6, Q8):** An overwhelming majority of respondents (92.6 % to 97.5 %) provided affirmative responses regarding the interface's brand identity (Q1), ease of use (Q2), design efficiency and intuitiveness (Q3), user adaptability (Q5), willingness to recommend (Q6), and the appropriateness of image/icon sizing (Q8). The mode for all binary items was "YES," indicating strong overall acceptance of the application's design, usability, and brand consistency. These findings align with the Technology Acceptance Model (TAM), particularly its emphasis on perceived ease of use and perceived usefulness [16], as evidenced by the high acceptance rates detailed in Table 5.

- **Visualized Technology Acceptance Model (TAM):** The relationships among perceived usefulness, perceived ease of use, attitude toward use, and behavioral intention—which are fundamental to application acceptance—are illustrated in Figure 3. The high agreement rates observed across all model components (Perceived Usefulness: 97 %, Perceived Ease of Use: 98 %, Attitude Toward Use: 96 %, and Behavioral Intention: 96 %) substantiate the conclusion of robust user acceptance.

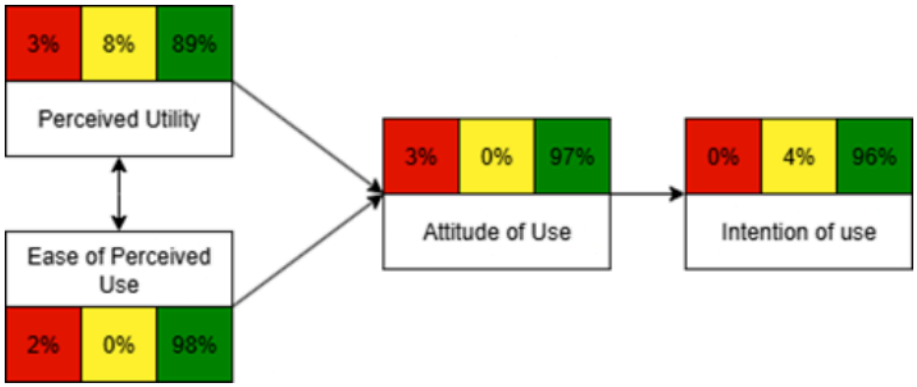


Figure 3: Technology Acceptance Model (TAM) and User Perception

- **Navigation Consistency (Q4):** While 97.5 % of respondents rated navigation as consistent, a marginal 2.5 % perceived inconsistencies. Although this represents a small minority, it suggests a specific area for potential optimization to further enhance the user experience, as detailed in Table 5.
- **Purchase Time Reduction (Q7):** The majority of users reported significant time savings during the purchasing process. The mean perceived reduction was calculated at 74.07 %, with both the median and mode at 75 %. This figure represents the weighted mean derived from the frequency distribution of user responses. Such a substantial reduction indicates that the application effectively streamlines purchasing workflows—a critical efficiency factor in e-commerce [27]. The detailed distribution of perceived time reductions is presented in Table 5.
- **Purchase Time Comparison (Q9 and Q10):**
  1. **Without mobile application (Q9):** Prior to implementation, 45.7 % of respondents reported requiring more than 30 minutes per purchase, while only 18.5 % needed 15–20 minutes. The mode was "30+ minutes," indicating significant inefficiencies and prolonged durations in the traditional purchasing workflow (see Table 5).
  2. **With mobile application (Q10):** Following the deployment of the application, 67.9 % of users completed purchases within the 15–20 minutes interval, and 28.4 % within 20–25 minutes. Notably, no respondents required more than 30 minutes to complete a transaction. The mode shifted to the "15–20 minutes" category, demonstrating a clear and substantial optimization. This marked improvement in efficiency is directly attributed to the implementation of the proposed solution, as evidenced by the comparative data in Table 5.

It is important to clarify the context of these measurements to understand the efficiency gain properly. The "Time without application" (Q9) encompasses the traditional in-store shopping workflow, including physical travel to the store, product browsing on shelves, and the manual checkout process. In contrast, "Time with application" (Q10) measures the complete digital session, from app login and catalog browsing to the final transaction. Therefore, the resulting duration of 15-20 minutes represents a significant optimization of the total purchasing workflow by eliminating physical logistics.

3.3. Overall Analysis of Findings

The implementation of the Mobile-D methodology proved pivotal in developing an efficient and adaptable mobile application for "Men's Locker Clothing Ec." Its agile framework facilitated rapid adaptation to evolving requirements throughout the development lifecycle, ensuring robust requirement gathering and comprehensive documentation. This structured yet flexible approach culminated in the delivery of a high-quality, user-centric application."

The survey results confirm that the mobile application significantly streamlines purchase completion and management workflows. Its efficient and adaptive design facilitates seamless interaction and accelerates user adoption. The high rates of brand consistency (97.5 %), ease of use (96.3 %), design efficiency (97.5 %), navigability (97.5 %), user adaptability (92.6 %), and the near-unanimous recommendation for use (97.5 %) collectively validate the success of the implementation regarding user experience and functionality. Furthermore, the mean purchase time reduction of 74.07 % serves as a critical quantitative indicator of the application's positive operational impact.

4. Discussion

This section presents a comprehensive analysis of the key research findings, interpreting them through the lens of the established theoretical framework and existing literature. Concurrently, it explores the practical and theoretical implications of these results, evaluating the overall impact and efficacy of the implemented technological solution.

4.1. Interpretation of Key Findings

The usability evaluation results, derived from the application of Nielsen's Heuristic Method by expert evaluators [14], provide compelling evidence of the high acceptance and operational effectiveness of the mobile application developed for "Men's Locker Clothing Ec". Notably, the unanimous consensus (100 %) confirming that the primary interface accurately reflects the retailer's brand identity is of significant importance. This alignment is critical, as established literature suggests that robust visual and brand consistency directly fosters user trust and enhances brand recognition [28].

The unanimous user perception (100 %) regarding ease of use, intuitiveness, and design efficiency serves as a robust validation of the Usability and User Experience (UX) principles applied during the development phase. These findings align closely with the Technology Acceptance Model (TAM), which posits that perceived ease of use is a critical determinant of technology adoption and behavioral intention to use [16]. Furthermore, the reported high user adaptability (100 %) and the unanimous willingness to recommend the application (100 %) reinforce the premise that welldesigned, intuitive interfaces are fundamental prerequisites for customer retention and market expansion within the e-commerce sector [29].

While a substantial majority (80 %) of respondents rated the application's navigability favorably, the 20 % who perceive inconsistencies highlights a distinct opportunity for future optimization. This finding corroborates existing literature, which underscores the critical role of interface consistency in mitigating user cognitive load and enhancing the overall user experience [30].

The most significant impact of the application is observed in the substantial reduction of purchase completion times. The data indicates that 60 % of users perceived a maximal improvement in process efficiency, while the remaining 40 % reported a 75 % improvement. These subjective perceptions, corroborated by objective time comparisons—which reveal a marked shift from intervals exceeding 30 minutes to a predominant 15–20 minutes range—strongly validate the research hypothesis: that the integration of advanced technological solutions significantly enhances business process efficiency. This operational optimization exemplifies a core benefit of e-commerce and automation, consistent with industry reports citing reductions in operational costs and concurrent increases in productivity [27].

4.2. Theoretical Implications

This study contributes to the extant literature on mobile application development and e-commerce by providing empirical evidence regarding the effectiveness of the Mobile-D methodology in an SME context. The results substantiate the practical utility of the Mobile-D framework [15], confirming that such agile techniques are capable of delivering high-quality, user-centric products even within resource-constrained environments.

The findings underscore the continued relevance of the Technology Acceptance Model (TAM) within the m-commerce domain. Specifically, the results demonstrate that Perceived Ease of Use (PEOU) and Perceived Usefulness (PU) serve as pivotal determinants of both application acceptance and the users' intention to recommend the platform. Furthermore, the synergistic integration of quantitative and qualitative methodologies [14] for usability evaluation proved instrumental. This mixed-methods approach yields a comprehensive understanding by synthesizing objective performance metrics with subjective user perceptions, a strategy that is indispensable for the effective design of human-centric interactive systems.

Moreover, the research highlights the critical necessity of brand consistency and intuitive navigability within interface design. While these elements are frequently underestimated in development processes, the findings suggest they are foundational pillars for optimizing User Experience (UX) and driving sustained technology adoption [31].

4.3. Practical and Managerial Implications

From a practical perspective, this study presents actionable managerial implications for "Men's Locker Clothing Ec" and analogous Small and Medium Enterprises (SMEs). Specifically, the findings suggest that:

- **User Experience Priority:** High satisfaction and recommendation rates confirm that an intuitive, easy-to-use design is an effective customer acquisition and retention strategy.

- **Operational Efficiency:** The demonstrated high levels of user satisfaction and recommendation rates substantiate that an intuitive, user-centric design functions as a critical strategic mechanism for both customer acquisition and long-term retention.
- **Competitive Advantage:** The deployment of a high-fidelity mobile application, integrated with advanced functionalities such as electronic invoicing [17], empowers SMEs to achieve competitive parity with larger market incumbents. By offering a sophisticated and efficient digital shopping experience, smaller enterprises can effectively bridge the technological gap.
- **Agile Methodology Adoption:** The successful implementation of the Mobile-D framework demonstrates the viability of agile methodologies for software development within the SME sector. These frameworks provide the necessary operational agility, allowing businesses to rapidly adapt technological assets in response to evolving market dynamics and consumer preferences.
- **Robust Technology Selection:** The strategic selection of the Flutter and Firebase ecosystem established a robust technological foundation. This scalable and secure infrastructure ensures the business is capable of supporting future growth and digital expansion without necessitating immediate, capital-intensive architectural changes [18].

4.4. Limitations and Future Research Directions

Notwithstanding the promising findings presented, this study is subject to certain limitations. Primarily, the usability evaluation was conducted with a restricted sample of four (4) expert evaluators. While this approach is empirically effective for the efficient identification of interface design flaws during early development stages, it inherently constrains the generalizability of the results to a broader, heterogeneous user population. Future research initiatives should therefore aim to expand the participant cohort to include a wider demographic spectrum, thereby facilitating large-scale usability testing to further validate these outcomes.

Furthermore, while the reduction in purchase completion time was empirically observed, the scope of this study precluded the direct assessment of long-term commercial impacts, specifically regarding total sales volume and conversion rates. Consequently, it is recommended that future research initiatives implement a longitudinal tracking framework focused on Key Performance Indicators (KPIs)—such as sales volume, Average Order Value (AOV), and customer retention rates. Such an approach is essential to accurately quantify the application's comprehensive economic impact and Return on Investment (ROI).

Finally, it is suggested that future development phases explore the integration of emerging technologies. Specific areas of high potential include Augmented Reality (AR) for Virtual Try-On (VTO) experiences and Artificial Intelligence (AI)-driven personalization algorithms. Furthermore, strategies for geographic market expansion should be evaluated to ensure the retailer sustains its competitive advantage within a rapidly evolving digital ecosystem.

5. Summary and Conclusions

This study successfully resolved the operational challenges confronting "Men's Locker Clothing Ec" through the strategic implementation of an e-commerce mobile application integrated with electronic invoicing. The research employed a descriptiveconstructive design utilizing the agile Mobile-D methodology, which demonstrated high efficacy in delivering a functional, user-centric solution tailored to the SME context. Furthermore, the mixed-methods evaluation strategy—synergizing quantitative usability metrics with qualitative expert feedback—provided a holistic assessment of the application's multidimensional impact.

The empirical findings demonstrate exceptional levels of usability and user acceptance. Expert evaluations yielded a unanimous consensus (100 %) confirming that the primary interface consistently reflects the brand identity, possesses an intuitive, usercentric design, and operates with high efficiency. Crucially, the application achieved a significant optimization of purchasing processes; 60 % of users reported a maximal improvement in time efficiency, while 40 % perceived a 75 % reduction. This is objectively evidenced by the transaction streamlining, which shifted from durations exceeding 30 minutes to a consolidated 15–20 minutes interval for the majority of users. Collectively, the unanimous recommendation rate (100 %) and favorable navigability ratings (80 %) validate the application's success in simultaneously enhancing the customer experience and operational efficiency.

In summation, the rigorous application of the Mobile-D methodology was instrumental in facilitating agile and timely development cycles, ensuring solution quality and usability through iterative refinement and comprehensive documentation. Concurrently, the strategic adoption of Flutter for cross-platform development, complemented by

Firebase for backend services, established a scalable and economically viable technological backbone. Ultimately, this integration not only resolves immediate operational challenges but also strategically positions the enterprise to compete effectively within the digital marketplace, driving simultaneous improvements in customer satisfaction and internal process optimization.

Derived from the empirical findings presented in this study, the following recommendations are formulated to sustain the operational success and guide the strategic evolution of the mobile application:

- **Continuous Updates and Improvements:** It is imperative to establish a protocol for regular application updates. This proactive strategy is essential to continuously optimize the User Experience (UX), integrate emerging technological paradigms, and adapt to dynamic market requirements, thereby ensuring the application's long-term relevance and competitiveness.
- **Proactive Requirements Management:** Future initiatives should prioritize the comprehensive specification of both functional and non-functional requirements at the project's inception. This foundational practice is critical to optimize the development lifecycle, mitigate the risk of scope creep, and ensure strict alignment with both strategic business objectives and user expectations.
- **Use of Modern Development Tools:** It is advised to maintain a rigorous schedule of updates for the development frameworks and environments, specifically Android Studio and the Flutter SDK. Leveraging the latest stable versions is essential to maximize rendering performance and utilize modern widgets, thereby facilitating the delivery of highly interactive, high-fidelity cross-platform applications.
- **Iterative and Comprehensive Testing:** The implementation of rigorous testing protocols at each phase of the development lifecycle is strongly recommended. This iterative approach enables the early detection and remediation of usability anomalies, thereby preventing user friction and ensuring a seamless and intuitive application interaction.

References:

[1] Tamilmani, K., Rana, N.P., Wamba, S.F., Dwivedi, R.: The extended unified theory of acceptance and use of technology (utaut2): A systematic literature review and theory evaluation. International Journal of Information Management 57, 102269 (2021) https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102269.

[2] Li-Ya Yan, Garry Wei-Han Tan, Xiu-Ming Loh, Jun-Jie Hew, Keng-Boon Ooi: QR code and mobile payment: The disruptive forces in retail. Journal of Retailing and Consumer Services 58, 102300 (2021) https://doi.org/10.1016/j.jretconser. 2020.102300 . Accessed 2025-01-27.

[3] Chang, Y.P., Li, J.: Seamless experience in the context of omnichannel shopping scale development and empirical validation. Journal of Retailing and Consumer Services 64, 102800 (2022) https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2021.102800.

[4] Baumert, T., Obesso, M.d.l.M.d.: Brand antiquity and value perception: Are customers willing to pay higher prices for older brands? Journal of Business Research 123, 241–254 (2021) https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.09.060.

[5] Scuotto, V., Nicotra, M., Giudice, M.D., Krueger, N., Gregori, G.L.: A microfoundational perspective on SMEs' growth in the digital transformation era. Journal of Business Research 129, 382–392 (2021) https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021. 01.045.

[6] Martínez-Peláez, R., Escobar, M.A., Félix, V.G., Ostos, R., Parra-Michel, J., García, V., Ochoa-Brust, A., Velarde-Alvarado, P., Félix, R.A., Olivares-Bautista, S., Flores, V., Mena, L.J.: Sustainable digital transformation for smes: A comprehensive framework for informed decision-making. Sustainability 16(11) (2024) https://doi.org/10.3390/su16114447.

[7] Guevara, R., Rodríguez Alvarez, S., Becerra, J.: Digital transformation and its impact on the competitiveness of SMEs in the retail sector: A systematic review. (2025). https://doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.550.

[8] Suominen, K.: El comercio digital en América Latina ¿Qué desafíos enfrentan las empresas y cómo superarlos? (2019). https://repositorio.cepal.org/items/ 0a811e17-9ea6-45bc-892a-c4baa49b3ef2.

[9] Gelder, K.: Topic: E-commerce worldwide (2025). https://www.statista.com/ topics/871/online-shopping/ Accessed 2025-01-27.

[10] Packiaraj Thangavel, Bibhas Chandra: Two Decades of M-Commerce Consumer Research: A Bibliometric Analysis Using R Biblioshiny. Sustainability 15(15), 11835 (2023) https://doi.org/10.3390/su151511835 . Accessed 2025-01-25.

[11] Gómez, A.L., López, S.J.: Innovation and transformation: Keys to the success of SMEs in the digital age 2(3) https://doi.org/10.59652/jeime.v2i3.253 . Accessed 2026-01-15.

[12] Allende, M.: SME Digital Transformation Fuels Latin American E-Commerce. Section: E-Commerce & Retail. https://mexicobusiness.news/ecommerce/news/ sme-digital-transformation-fuels-latin-american-e-commerce Accessed 2026-0115.

[13] S. S. Nair, Smritika S. Prem: A Framework for Mixed-method Research. Management Science (2020). Accessed 2025-04-30.

[14] Li, X., Zhao, X., Xu, W.A., Pu, W.: Measuring ease of use of mobile applications in e-commerce retailing from the perspective of consumer online shopping behaviour patterns. Journal of Retailing and Consumer Services 55, 102093 (2020) https: //doi.org/10.1016/j.jretconser.2020.102093 . Accessed 2024-12-10.

[15] Castilla, R., Pacheco, A., Franco, J.: Digital government: Mobile applications and their impact on access to public information. SoftwareX22, 101382 (2023) https://doi.org/10.1016/j.softx.2023.101382.

[16] Sykora, M., Elayan, S., Hodgkinson, I.R., Jackson, T.W., West, A.: The power of emotions: Leveraging user generated content for customer experience management. Journal of Business Research 144, 997–1006 (2022) https://doi.org/10. 1016/j.jbusres.2022.02.048.

[17] Matthieu Bellon, Era Dabla-Norris, Salma Khalid, Frederico Lima: Digitalization to improve tax compliance: Evidence from VAT e-Invoicing in Peru. Journal of Public Economics 210, 104661 (2022) https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2022.104661 . Accessed 2025-04-10.

[18] Kesavan, R., Gay, D., Thevessen, D., Shah, J., Mohan, C.: Firestore: The nosql serverless database for the application developer. In: 2023 IEEE 39th International Conference on Data Engineering (ICDE), pp. 3376–3388 (2023). https://doi.org/10.1109/ICDE55515.2023.00259.

[19] Khan, S.M., Nabi, A.U., Bhanbhro, T.H.: Comparative Analysis between Flutter and React Native. International Journal of Artificial Intelligence & Mathematical Sciences 1(1), 15–28 (2022) https://doi.org/10.58921/ijaims.v1i1.19 . Number: 1. Accessed 2025-04-30.

[20] Ashita, V. Bahl, A. Goel, and N. Sengar: Android based instant messaging tool using firebase as backend. International Journal for Modern Trends in Science and Technology 6(12), 198–201 (2020) https://doi.org/10.46501/IJMTST061238 . Accessed 2025-04-11.

[21] Serafino Cicerone, Gabriele Di Stefano, Alfredo Navarra: A structured methodology for designing distributed algorithms for mobile entities. Information Sciences 574, 111–132 (2021) https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.05.043 . Accessed 202504-30.

[22] Abrahamsson, P., Hanhineva, A., Hulkko, H., Ihme, T., Jäälinoja, J., Korkala, M., Koskela, J., Kyllönen, P., Salo, O.: Mobile-d: an agile approach for mobile application development. In: Companion to the 19th Annual ACM SIGPLAN Conference on Object-Oriented Programming Systems, Languages, and Applications. OOPSLA '04, pp. 174–175. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA (2004). https://doi.org/10.1145/1028664.1028736 . https://doi.org/10.1145/1028664.1028736.

[23] Wardhanie, A.P., Rahmawati, E.: Pengenalan dan Penerapan User Interface and User Experience Design for Beginners. Batara Wisnu Journal Indonesian Journal of Community Services 2(3), 536–544 (2022) https://doi.org/10.53363/bw.v2i3. 129.

[24] Wardhanie, A.P., Rahmawati, E.: Pengenalan dan Penerapan User Interface and User Experience Design for Beginners. Batara Wisnu Journal Indonesian Journal of Community Services 2(3), 536–544 (2022) https://doi.org/10.53363/bw.v2i3. 129.

[25] Chad Lochmiller: Conducting Thematic Analysis with Qualitative Data. The Qualitative Report (2021) https://doi.org/10.46743/2160-3715/2021.5008 . Accessed 2025-04-11.

[26] GDPR.eu: General Data Protection Regulation (GDPR) Compliance Guidelines (2025). https://gdpr.eu/ Accessed 2025-04-11.

[27] Work, T.: The future of work (2025). https://www.deloitte.com/global/en/services/consulting/collections/future-of-work.html Accessed 2025-01-27.

[28] Kim, M., Kim, J.-H., Park, M., Yoo, J.: The roles of sensory perceptions and mental imagery in consumer decision-making. Journal of Retailing and Consumer Services 61, 102517 (2021) https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2021.102517.

[29] Graeme McLean, Kofi Osei-Frimpong, Khalid Al-Nabhani: Examining consumer attitudes towards retailers m-commerce mobile applications – An initial adoption vs. continuous use perspective. Journal of Business Research 106, 139–157 (2020) https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.08.032 . Accessed 2025-01-25.

[30] Patel, V., Das, K., Chatterjee, R., Shukla, Y.: Does the Interface Quality of Mobile Shopping Apps Affect Purchase Intention? An Empirical Study. Australasian Marketing Journal 28(4), 300–309 (2020) https://doi.org/10.1016/j.ausmj.2020.08.004 . Publisher: SAGE Publications Ltd. Accessed 2024-12-10.

[31] Lin Wang, Zhihua Wang, Xiaoying Wang, Yang Zhao: Explaining consumer implementation intentions in mobile shopping with SEM and fsQCA: Roles of visual and technical perceptions. Electronic Commerce Research and Applications 49, 101080 (2021) https://doi.org/10.1016/j.elerap.2021.101080 . Accessed 2025-01-25.

IDEAS

Innovation & Development in Engineering and Applied Science

Journal homepage: https://revistasojs.utn.edu.ec/index.php/ideas

Modelo de procesos para un servicio de testing de software y su influencia e n l a c alidad del producto final

Process Model for a Software Testing Service and its Influence on Final Product Quality

Cayo León [a], Alejandro Bartra [a], Fany Sobero [a], Marcelo Cisneros [b]

[a] Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería en Sistemas de Informática, Lima-Peru.

[b] Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Ibarra-Ecuador.

Recibido: 30/10/2025, Aceptado: 08/01/2026, Publicado: 30/01/2026

Autor de correspondencia:

Cayo León: cleonf@unmsm.edu.pe

DOI: 10.53358/ideas.v8i1.1330

PALABRAS CLAVE

testing de software,
calidad,
outsourcing,
modelo de procesos,
CMMI.

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo establecer cómo un modelo de procesos para un servicio de testing de software incide en la calidad del producto final. El estudio se justifica ante la ausencia de un enfoque unificador que integre marcos como CMMI, TMMI, ITIL y PMBOK para gestionar servicios de testing bajo outsourcing. Se aplicó un enfoque metodológico de Ciencia del Diseño que combinó revisión bibliográfica, construcción de un modelo y validación mediante un estudio de caso en una consultora peruana especializada. Los resultados mostraron mejoras sustantivas en la eficiencia del tiempo de entrega, reducción de incidencias y aumento de la satisfacción del cliente. La implementación del modelo permitió un control más riguroso de los procesos, evidenciando que la adopción de buenas prácticas internacionales impacta positivamente en la calidad y confiabilidad del software entregado. Se concluye que la propuesta contribuye a estandarizar procesos críticos en organizaciones de testing.

KEYWORDS

software testing,
quality,
outsourcing,
process model,
CMMI.

ABSTRACT

The research aimed to establish how a process model for a software testing service affects the quality of the final product. This study is justified by the lack of a unified approach that integrates frameworks such as CMMI, TMMI, ITIL, and PMBOK to manage testing services under outsourcing schemes. A Design Science methodological approach was applied, combining literature review, model development, and validation through a case study in a Peruvian specialized consultancy. The results showed substantial improvements in delivery time efficiency, reduction of incidents, and increased customer satisfaction. Implementing the model enabled more rigorous process control, demonstrating that adopting international best practices positively impacts the quality and reliability of delivered software. The study concludes that the proposal contributes to standardizing critical processes in testing organizations.

1. Introducción

El aseguramiento de la calidad del software se consolidó como una prioridad estratégica en las organizaciones modernas que, durante las últimas décadas, experimentaron un proceso acelerado de transformación digital. Este fenómeno respondió a la necesidad de contar con sistemas confiables que soportaran procesos críticos de negocio y garantizaran la disponibilidad de los servicios frente a una demanda creciente de usuarios más informados y exigentes. La calidad debía concebirse de manera integral, incorporando la capacidad del producto de cumplir los requisitos definidos, adaptarse a cambios y mantener su desempeño en entornos complejos, lo que exigió un enfoque preventivo basado en metodologías sistemáticas y métricas objetivas [1]. En este marco, el testing de software adquirió un papel fundamental al posibilitar la verificación temprana de los componentes y reducir la probabilidad de errores graves que afectaran la operación y la percepción de confianza.

A pesar de su relevancia dentro del aseguramiento de la calidad, diversos estudios han evidenciado que el testing de software ha sido tratado en la práctica como una actividad secundaria y reactiva, generalmente relegada a las fases finales del ciclo de desarrollo o limitada a la corrección de defectos reportados por los usuarios finales [2]. Esta aproximación ha sido cuestionada por la literatura reciente, la cual señala que la ausencia de un enfoque sistemático y temprano de pruebas incrementa significativamente los costos de retrabajo y reduce la calidad percibida del producto entregado [3]. En contextos caracterizados por plazos de entrega cada vez más ajustados y una presión competitiva creciente, las organizaciones que no integran el testing como un proceso transversal enfrentan mayores riesgos financieros, operativos y reputacionales [3], especialmente cuando liberan productos con fallas funcionales o deficiencias de rendimiento [4].

En este escenario, la externalización u outsourcing de servicios de testing se presenta como una alternativa estratégica para optimizar recursos, reducir costos y acceder a competencias especializadas que no siempre se encuentran disponibles en las estructuras internas de las organizaciones [5]. Estudios recientes indican que el outsourcing de testing se ha consolidado como una práctica recurrente en sectores altamente regulados y tecnológicamente complejos, como banca, telecomunicaciones y retail, donde la confiabilidad del software resulta crítica para la continuidad del negocio [6]. No obstante, la delegación de estas actividades a proveedores externos también introduce desafíos importantes, particularmente en la definición de contratos, el control de los acuerdos de nivel de servicio y la gestión de la información crítica compartida entre cliente y proveedor [7], lo que refuerza la necesidad de contar con marcos metodológicos claros que delimiten roles, procesos y responsabilidades de manera precisa [3].

Los antecedentes revisados permitieron constatar que, aunque marcos de referencia como CMMI, TMMi, ITIL y PMBOK alcanzaron un elevado nivel de adopción a nivel internacional, cada uno abordó dimensiones específicas de la gestión de proyectos, la calidad del software o la prestación de servicios de TI, sin ofrecer un enfoque transversal aplicable a la externalización de testing. CMMI-DEV, por ejemplo, se enfocó en la madurez de los procesos de desarrollo, proporcionando prácticas que posibilitaron avanzar desde niveles básicos hasta estadios cuantitativamente gestionados, pero no contempló las particularidades contractuales y operativas propias del testing prestado por terceros [8]. Esta situación generó una fragmentación metodológica que se tradujo en dificultades para estandarizar procesos y medir objetivamente los resultados alcanzados en proyectos de validación externa.

En términos específicos, TMMi se constituyó como un marco orientado a evaluar la madurez de los procesos de testing, definiendo niveles y prácticas progresivas que contribuyeron a profesionalizar la actividad [9]. No obstante, su aplicación en entornos de outsourcing resultó limitada al no integrar aspectos esenciales como la gestión de acuerdos de nivel de servicio, la transferencia de conocimiento entre cliente y proveedor y la alineación de objetivos estratégicos. De manera similar, ITIL ofreció un conjunto de procesos esenciales para la gestión de servicios de TI, entre los que destacaron la gestión de incidentes, de problemas y de niveles de servicio, pero su aplicación directa al testing requirió adaptaciones y lineamientos específicos que no siempre fueron recogidos en los estándares [10].

Por su parte, PMBOK aportó un enfoque transversal a la gestión de proyectos mediante la definición de procesos de inicio, planificación, ejecución, monitoreo y cierre, con prácticas que favorecieron la estandarización y el control [11]. Sin embargo, este estándar se enfocó en la dirección general de proyectos y no en la especificidad técnica que caracteriza los procesos de validación de software, por lo que su aplicación al testing prestado bajo outsourcing demandó adecuaciones que no siempre fueron documentadas de manera clara en la literatura académica [11]. Como consecuencia, la ausencia de un modelo integral que combinara estos marcos generó vacíos operativos que afectaron la consistencia, la calidad y la capacidad de monitoreo de los procesos de prueba en entornos tercerizados.

La relevancia de esta problemática se acentuó al considerar que el testing representa, en promedio, entre un 30 % y un 50 % del costo total de los proyectos de desarrollo, convirtiéndose en uno de los componentes más críticos de la inversión en tecnología. Asimismo, se ha señalado que el costo de corregir defectos identificados en fases finales puede incrementarse de manera considerable respecto de su detección temprana mediante pruebas planificadas y sistemáticas [12]. Estos hallazgos justificaron la necesidad de contar con modelos que permitan optimizar el uso de recursos, reducir

el retrabajo y garantizar entregables de calidad.

Los antecedentes recopilados también resaltaron el valor de concebir el testing como un proceso continuo y preventivo. La integración articulada entre verificación, validación y desarrollo ha sido destacada como un enfoque que mejora el control del producto y la consistencia de los entregables [13], mientras que la calidad del servicio de testing también se expresa en términos percibidos por quienes consumen y evalúan los resultados [14]. Este enfoque se complementó con evidencia que sostiene que, incorporar el testing desde etapas tempranas mejora la confiabilidad y reduce el retrabajo al evitar que los defectos se acumulen hacia el final del ciclo [15].

Asimismo, se ha descrito que el continuous testing en entornos DevOps deja de ser una tarea final y pasa a operar como un mecanismo de retroalimentación permanente que fortalece la estabilidad del producto y la capacidad de entrega [16]. De forma coherente, revisiones sistemáticas han mostrado que la adopción de integración continua impacta en la calidad asegurada al promover prácticas de prueba frecuentes y detectar problemas antes de que escalen [17]. Del mismo modo, se ha reportado evidencia empírica de que el shift-left testing se asocia con mejoras en la calidad del software al adelantar actividades de verificación y disminuir defectos tardíos que suelen afectar plazos y costo [18]. Finalmente, se ha señalado que la automatización de pruebas en DevOps se consolida como un habilitador del aseguramiento continuo, siempre que exista una gestión explícita de prácticas, herramientas y responsabilidades, lo que refuerza la necesidad de modelos de procesos que ordenen el servicio de testing en la operación real [19].

La propuesta de alineamiento entre TI y negocio ha destacado la necesidad de sincronizar los objetivos del testing con los del desarrollo y con las metas organizacionales, a fin de reducir riesgos asociados a la fragmentación de procesos [20]. En la misma línea, se ha advertido que la adopción efectiva de estándares internacionales requiere adaptación contextual, considerando cultura organizacional, gestión del cambio y nivel de madurez de procesos, lo que sustenta la necesidad de propuestas metodológicas flexibles para entornos latinoamericanos [21].

La presente investigación tuvo como propósito diseñar un Modelo de Procesos que integrara fundamentos de CMMI, TMMi, ITIL y PMBOK, con la finalidad de estandarizar la gestión de servicios de testing de software externalizados y facilitar su alineación con los objetivos estratégicos de las organizaciones clientes [8], [9]. El proceso de validación se efectuó mediante un estudio de caso en una empresa consultora peruana que prestó servicios de testing a clientes del sector financiero y retail, permitiendo contrastar la hipótesis general de influencia significativa del modelo sobre la calidad del producto final y la percepción del servicio recibido por el cliente [5]. Los objetivos se organizaron en un objetivo general orientado a determinar la influencia del modelo en la calidad percibida y en objetivos específicos vinculados con tiempos de entrega, reducción de defectos, fortalecimiento de capacidades y satisfacción del cliente [11].

La relevancia del estudio se refuerza con proyecciones del mercado mundial de outsourcing de testing, que estiman un crecimiento sostenido y una expansión significativa del volumen económico del sector en la próxima década [22]. Finalmente, el método se desarrolló bajo el enfoque de Ciencia del Diseño, dado que permite construir y evaluar un artefacto metodológico orientado a resolver un problema organizacional real, articulando rigor académico y utilidad práctica [23].

2. Materiales y Métodos

La investigación se desarrolló bajo un enfoque metodológico de Ciencia del Diseño, que permitió concebir, construir y evaluar un modelo de procesos orientado a mejorar la calidad de los productos de software mediante un servicio de testing prestado bajo outsourcing. Este enfoque fue seleccionado porque permitió integrar la generación de conocimiento teórico con el desarrollo de un artefacto práctico capaz de resolver un problema real en un entorno organizacional específico, alineándose con los planteamientos sobre la pertinencia de la Ciencia del Diseño en entornos complejos donde convergen variables tecnológicas, organizacionales y de gestión [23].

El estudio adoptó un diseño aplicado, con un nivel explicativo, puesto que no se limitó a describir las prácticas existentes, buscó establecer relaciones de influencia entre el modelo propuesto y la calidad percibida del producto final. La investigación se organizó en tres fases sucesivas. La primera correspondió a la identificación y análisis del problema, mediante la revisión documental de literatura científica, estándares internacionales, marcos de referencia y estudios previos relacionados con CMMI, TMMI, ITIL y PMBOK, así como el levantamiento de información sobre el estado actual de los procesos de testing en la organización participante. Este diagnóstico permitió identificar carencias de estandarización, debilidades en la medición de indicadores y ausencia de integración entre los componentes de gestión de servicios y gestión de proyectos.

La segunda fase consistió en el diseño y construcción del modelo de procesos, que integró elementos de los marcos estudiados. En la Figura 1 se presenta el diagrama general del modelo de procesos propuesto, en el cual se articulan los cuatro componentes definidos: gestión de la ejecución de pruebas, gestión del servicio de testing, gestión de la mejora continua y control de la infraestructura y el testware. El diagrama evidencia la naturaleza iterativa del modelo y su

alineación con un enfoque de mejora continua. Cada componente se desagregó en procesos específicos, roles, artefactos y métricas que orientaron su aplicación. Durante esta etapa, se elaboraron diagramas de procesos, definiciones de procedimientos y matrices de responsabilidades que facilitaron la comprensión del modelo por parte de los equipos de trabajo.

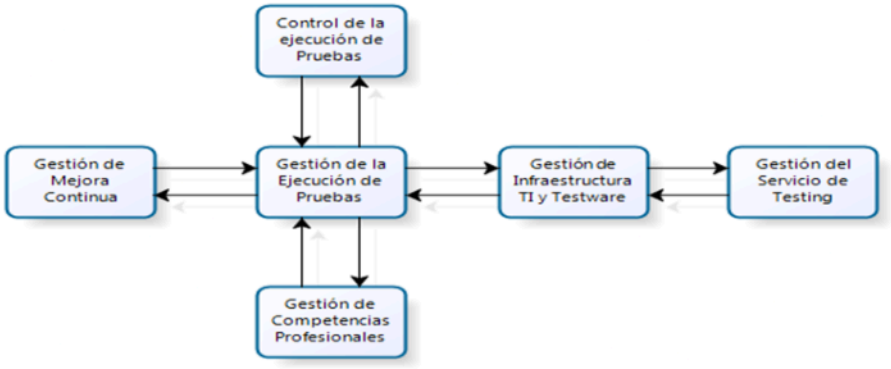


Figura 1: *Diagrama general del modelo*

Asimismo, para garantizar una adecuada gobernanza del proceso de gestión de ejecución de pruebas, se definieron roles específicos con funciones claramente delimitadas, evitando superposiciones y asegurando la trazabilidad de las responsabilidades. Los roles establecidos fueron los siguientes (véase la Tabla 1):

Tabla 1: Roles definidos para el proceso de gestión de ejecución de pruebas

Rol	**Funciones principales**
Gestor de Pruebas	Toma de decisiones estratégicas, supervisión y coordinación general del servicio de testing, gestión de equipos de trabajo, seguimiento del cumplimiento de hitos y objetivos, y elaboración de reportes a nivel ejecutivo para la alta dirección y el cliente.
Consultor de Calidad	Control de entregables, actividades de consultoría en calidad, diseño y planificación de líneas de implantación del modelo, así como coordinación y seguimiento operativo para asegurar el cumplimiento de estándares y buenas prácticas.
Analista de Pruebas	Diseño y planificación de las pruebas, asignación y control de equipos de trabajo a nivel operativo, elaboración de entregables, ejecución de líneas de implantación del modelo y elaboración de reportes operativos de avance y resultados.
Ingeniero de Pruebas	Diseño y ejecución de pruebas, registro y seguimiento de defectos, y coordinación de las líneas de resolución de defectos con los equipos de desarrollo y otros actores involucrados.
Tester	Ejecución de los casos de prueba definidos y registro detallado de los defectos identificados durante el proceso de testing.

La definición de estos roles permitió establecer una estructura jerárquica y funcional clara, alineada con las prácticas recomendadas por marcos como TMMI e ITIL, y facilitó la coordinación entre los distintos niveles de gestión del servicio. También es importante destacar que el modelo contempló la generación de artefactos documentales que soportan la planificación, ejecución y control del servicio de testing, asegurando la trazabilidad de las actividades y la disponibilidad de información para la toma de decisiones, como se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2: Artefactos del proceso de gestión de ejecución de pruebas

Artefacto	**Descripción**
Plan de Pruebas	Documento que define el alcance, la estrategia, los recursos, el cronograma y los criterios de aceptación del proceso de testing.
Casos de Prueba	Especificaciones detalladas de los escenarios de prueba, condiciones de ejecución y resultados esperados.
Registro de Defectos	Repositorio estructurado para el registro, clasificación y seguimiento de los defectos identificados durante las pruebas.
Reporte de Avance	Informe periódico que consolida el estado de ejecución de las pruebas, incidencias y riesgos identificados.
Informe de Resultados	Documento final que presenta las métricas de calidad, los defectos detectados y la evaluación global del ciclo de testing.

Para evaluar el desempeño del modelo y su influencia en la calidad del producto final, se definieron métricas orientadas al control del proceso y a la medición de resultados. Estas métricas permitieron realizar comparaciones objetivas antes y después de la implementación del modelo, tal como se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3: Métricas definidas en el modelo de procesos

Métrica	**Descripción**
Tasa de defectos	Número de defectos detectados por ciclo de pruebas.
Defectos tardíos	Cantidad de defectos identificados en fases posteriores a la ejecución de pruebas.
Tiempo medio de ejecución	Duración promedio del ciclo de pruebas en cada proyecto.
Cumplimiento del plan de pruebas	Grado de cumplimiento de las actividades y plazos definidos en el plan de pruebas.
Nivel de retrabajo	Porcentaje de actividades que requieren re-ejecución debido a defectos no detectados oportunamente.

Finalmente, en la última etapa, con el objetivo de hacer más claro la participación de cada rol en las actividades clave del proceso de gestión de ejecución de pruebas, se elaboró una matriz de responsabilidades basada en el enfoque RACI (Responsable, Aprobador, Consultado, Informado), como se muestra en la Tabla **??**.

Tabla 4: Matriz de responsabilidades del proceso de gestión de ejecución de pruebas

Actividad	**Gestor de Pruebas**	**Consultor de Calidad**	**Analista de Pruebas**	**Ingeniero de Pruebas**	**Tester**
Planificación de pruebas	R	C	A	C	I
Diseño de casos de prueba	I	C	R	A	I
Ejecución de pruebas	I	I	C	R	R
Registro y seguimiento de defectos	I	C	A	R	R
Elaboración de reportes	R	C	R	C	I
Cierre del ciclo de pruebas	R	A	C	I	I

(R = Responsable, A = Aprobador, C = Consultado, I = Informado)

La tercera fase de la investigación se centró en la validación empírica del modelo de procesos propuesto, mediante la aplicación de un estudio de caso en una empresa peruana especializada en servicios de testing de software que atendía clientes de los sectores financiero y retail. La validación se desarrolló durante un periodo de seis meses consecutivos, comprendido entre enero y junio de 2024, lapso que permitió observar de manera sistemática el comportamiento de los indicadores de calidad antes y después de la implementación del modelo.

El proceso de validación se estructuró en tres etapas temporales claramente diferenciadas. En una primera etapa, correspondiente a los dos primeros meses, se realizó el levantamiento de la línea base de los indicadores de calidad, utilizando información histórica de proyectos de testing ejecutados bajo el enfoque previo de la organización. Esta etapa permitió identificar el estado inicial de variables como la percepción de calidad del producto final, los tiempos de entrega

y el número de defectos detectados en fases tardías del ciclo de desarrollo. En una segunda etapa, desarrollada durante el tercer mes, se llevó a cabo la capacitación de los equipos responsables, incluyendo al gestor de pruebas, consultor de calidad, analistas, ingenieros de pruebas y testers, con énfasis en la comprensión del modelo, los nuevos procedimientos, roles, métricas y artefactos definidos. Finalmente, la tercera etapa correspondió a la aplicación del modelo durante los últimos tres meses, en proyectos reales de testing ejecutados para clientes de los sectores mencionados.

Durante la implementación del modelo, se utilizaron indicadores de calidad orientados tanto al desempeño del proceso de testing como a la percepción del producto final. Entre los indicadores de calidad del proceso, se consideraron el tiempo medio de ejecución de las pruebas, el nivel de cumplimiento del plan de pruebas, la tasa de defectos detectados por ciclo y la cantidad de defectos identificados en fases posteriores al cierre del testing. Estos indicadores permitieron evaluar la eficiencia operativa del modelo y su capacidad para detectar defectos de manera temprana, reduciendo el retrabajo y los riesgos asociados a la liberación del software.

Adicionalmente, se definieron indicadores de calidad del producto final basados en la percepción, los cuales fueron medidos mediante un cuestionario estructurado aplicado a los miembros del equipo de testing y al responsable del servicio. Las variables de percepción de calidad incluyeron la confiabilidad del software entregado, entendida como la ausencia de fallos críticos; la conformidad con los requisitos funcionales definidos; la estabilidad del producto durante las pruebas de regresión; y la satisfacción general con el resultado del proceso de testing. Estas variables se evaluaron mediante una escala tipo Likert de cinco niveles, permitiendo captar cambios en la valoración de la calidad antes y después de la implementación del modelo.

En la Figura 2 se presenta el diagrama general del modelo de testing aplicado durante la fase de validación empírica, donde se observa la integración de las actividades de planificación, diseño, ejecución y control de pruebas, así como los mecanismos de retroalimentación hacia la gestión de la mejora continua y el control de la infraestructura y el testware. La representación gráfica permitió visualizar la secuencia de actividades, los puntos de control y la interacción entre los roles definidos, facilitando la comprensión del modelo y su correcta aplicación durante los proyectos analizados.

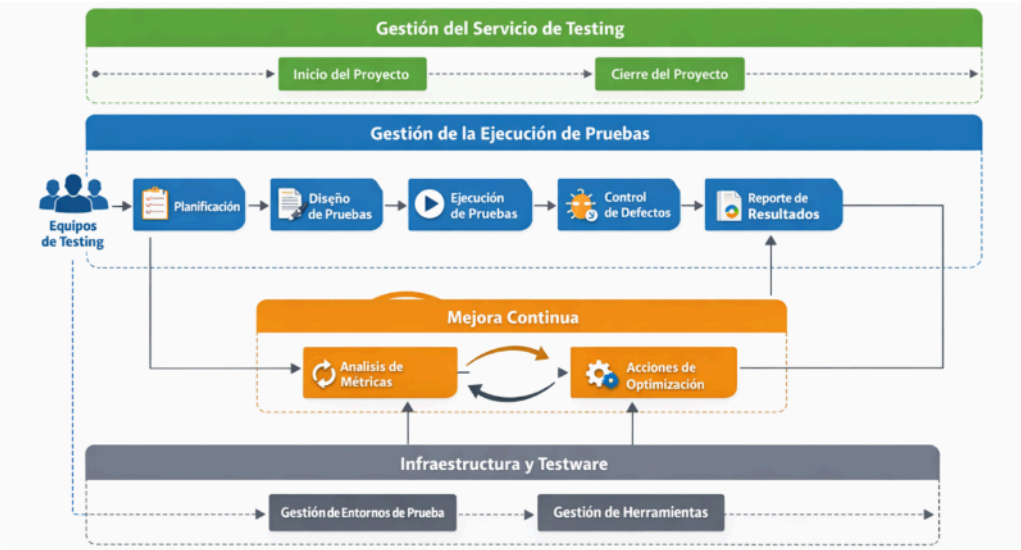


Figura 2: *Diagrama general del modelo de testing*

La población estuvo conformada por los proyectos de testing ejecutados por la empresa durante el periodo de estudio, considerando aquellos orientados a actividades de validación funcional, pruebas de regresión y pruebas de integración en clientes de los sectores financiero y retail. Estos proyectos representaron el universo de intervención del servicio de testing dentro del contexto organizacional analizado. La muestra se constituyó de manera no probabilística, mediante un muestreo por criterio, seleccionándose únicamente aquellos proyectos que cumplieron criterios de pertinencia previamente definidos, con el objetivo de garantizar la consistencia y comparabilidad de los resultados obtenidos. Entre los criterios de pertinencia considerados se incluyeron:

a) Proyectos que contaran con un alcance claramente definido y documentado en términos de requisitos funcionales;

b) Proyectos con un volumen de transacciones medio o alto, característico de los sistemas del sector financiero y retail;

c) Proyectos que hubieran sido ejecutados en ciclos de testing completos, permitiendo observar todas las etapas del proceso; y

d) Proyectos que dispusieran de información histórica confiable sobre indicadores de calidad, tales como tiempos de entrega, defectos detectados y resultados de pruebas previas, lo que posibilitó realizar comparaciones objetivas antes y después de la implementación del modelo.

Adicionalmente, se consideró como criterio de inclusión que los proyectos seleccionados se desarrollaron bajo condiciones operativas similares, en cuanto a herramientas de testing, infraestructura tecnológica y composición del equipo, con el fin de minimizar la influencia de variables externas en los resultados del estudio.

La muestra estuvo conformada por catorce (14) miembros del equipo de testing, entre analistas, ingenieros de pruebas y testers, así como un (1) Team Leader responsable del área, quienes participaron de manera directa en la adopción y aplicación del nuevo enfoque metodológico. La participación activa de estos actores permitió recoger información relevante tanto sobre el desempeño del proceso de testing como sobre la percepción de la calidad del producto final, fortaleciendo la validez interna del estudio.

Para el análisis de los datos se empleó estadística descriptiva e inferencial. La estadística descriptiva permitió caracterizar las variables estudiadas mediante frecuencias, medias y desviaciones estándar, describiendo el comportamiento de la percepción de calidad del producto final antes y después de la implementación del modelo. El procesamiento estadístico se realizó utilizando IBM SPSS Statistics (software privativo), herramienta ampliamente utilizada en investigación aplicada para el análisis de datos con escalas tipo Likert y modelos de regresión. Con el propósito de establecer si la aplicación del modelo de procesos para el servicio de testing influye significativamente en la calidad percibida del producto final, se utilizó regresión logística ordinal, dado que la variable dependiente se midió en una escala ordinal de cinco niveles. El análisis se ejecutó con un nivel de confianza del 95 % ($\alpha = 0{,}05$).

En términos inferenciales, se formularon las siguientes hipótesis:

- H_0 (Hipótesis nula): La aplicación del modelo de procesos para el servicio de testing no influye significativamente en la calidad percibida del producto final.
- H_1 (Hipótesis alternativa o afirmativa): La aplicación del modelo de procesos para el servicio de testing influye significativamente en la calidad percibida del producto final.

La consistencia interna del instrumento se evaluó mediante el coeficiente Alfa de Cronbach, calculado en IBM SPSS Statistics (software privativo). Los resultados mostraron niveles adecuados de fiabilidad, con valores que se ubicaron en el rango de aceptables a altos según las dimensiones evaluadas (Tabla 5). En consecuencia, se consideró que el instrumento presenta consistencia interna suficiente para el análisis de las variables del estudio.

Previo al desarrollo del análisis inferencial, se evaluó el supuesto de normalidad debido al tamaño muestral reducido. Se aplicó la prueba Shapiro–Wilk, recomendada para muestras pequeñas (en particular, cuando $n < 30$). Los resultados de Shapiro–Wilk (Tabla 6) indicaron que la distribución no fue normal ($p < 0{,}05$).

Tabla 5: Consistencia interna del instrumento (Alfa de Cronbach)

Escala / Dimensión	**N° de ítems**	**Alfa de Cronbach (α)**
Gestión de la ejecución de pruebas	3	0.85
Gestión del servicio de testing	3	0.83
Gestión de la mejora continua	3	0.83
Control de infraestructura y testware	3	0.84
Calidad percibida del producto final	3	0.85

Tabla 6: Prueba de normalidad (Shapiro–Wilk)

	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	**gl**	**Sig.**
Aplicación del modelo de procesos	0.622	70	.000
Calidad percibida del producto final	0.490	70	.000

3. Resultados

La aplicación del modelo de procesos para un servicio de testing de software se llevó a cabo durante un periodo planificado que comprendió la fase de capacitación, el acompañamiento en la ejecución de proyectos piloto y la recopilación de indicadores de desempeño y percepción de la calidad. A continuación, se describen los principales resultados obtenidos, organizados en dimensiones clave definidas en la investigación.

En primer lugar, como se muestra en la Tabla 7, se observó una mejora significativa en la percepción de calidad del producto final. Antes de la implementación del modelo, la evaluación promedio de esta dimensión se ubicaba en un nivel medio, con una media de 3.21 en una escala Likert de 1 a 5. Después de la adopción del modelo, la media ascendió a 4.30, indicando una valoración alta de la calidad por parte de los participantes. Este incremento reflejó el efecto positivo de la estandarización de prácticas, la mayor claridad en la definición de roles y la adopción de procedimientos de validación más rigurosos.

Tabla 7: Comparativo de percepción de calidad del producto final (escala 1–5)

Periodo	Media	Desviación estándar
Antes del Modelo	3.21	0.67
Después del Modelo	4.30	0.48

La Tabla 7, muestra que la dispersión de las respuestas se redujo, lo que sugiere una percepción más homogénea entre los miembros del equipo respecto de la calidad lograda. Este hallazgo coincidió con los registros de incidencias, que mostraron una disminución del número de defectos detectados en fases de control posterior.

En relación con la eficiencia de tiempos de entrega, se observó una reducción promedio del 16 % en los plazos de finalización de los proyectos analizados. Este resultado se vinculó con la mejora en la planificación de las actividades de testing, la definición clara de estimaciones de esfuerzo y la asignación de responsabilidades específicas al Team Leader y los testers Senior. La Figura 3 ilustra la evolución del indicador de tiempo medio de entrega:

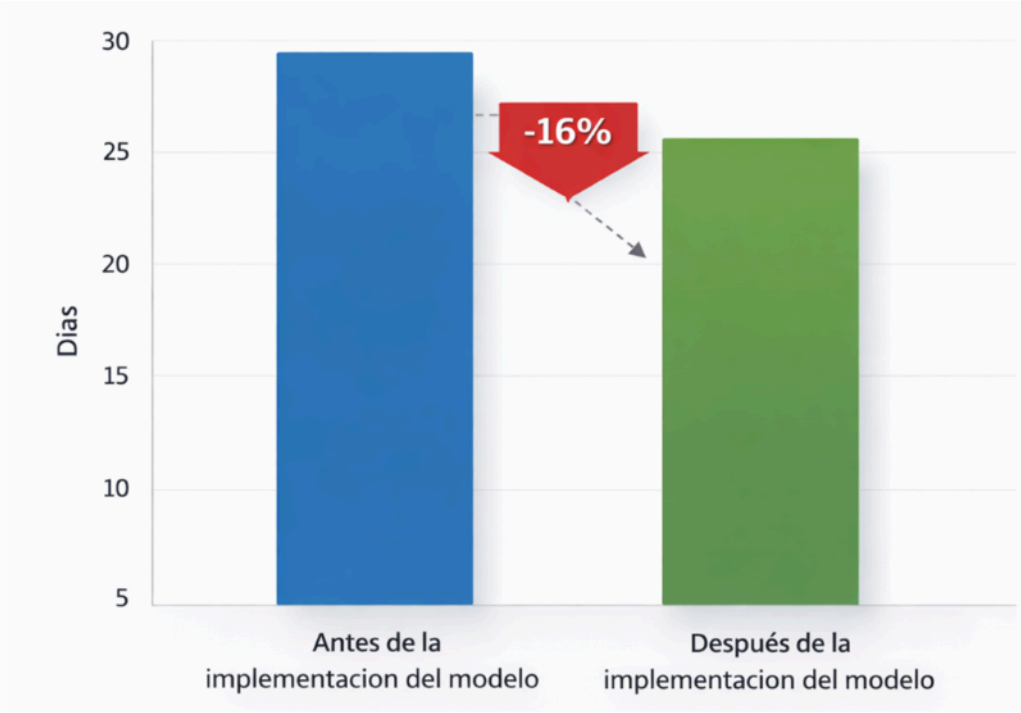


Figura 3: *Evolución del indicador de tiempo medio de entrega*

El análisis de la reducción de incidencias según Tabla 8, mostró un descenso del 23 % en el número de defectos no identificados en fases tempranas, lo que puso en evidencia la eficacia de los mecanismos de control incorporados en el modelo, particularmente en el componente de gestión de ejecución de pruebas. Este comportamiento fue consistente en los distintos proyectos considerados en la muestra.

Tabla 8: Comparativo de incidencias detectadas

Periodo	**Número de incidencias promedio**
Antes del Modelo	14
Después del Modelo	10.8

La recolección de datos se realizó mediante dos cuestionarios estructurados tipo Likert (1 = totalmente en desacuerdo a 5 = totalmente de acuerdo), aplicados a los integrantes del equipo de testing, considerando los roles operativos y de coordinación del servicio. El cuestionario "Modelo de Procesos para un Servicio de Testing de Aplicaciones", estuvo compuesto por 18 ítems distribuidos en seis dimensiones, con tres ítems por dimensión. El cuestionario "Calidad del Producto Final y percepción del servicio entregado al cliente", compuesto por 13 ítems distribuidos en cuatro dimensiones: tres dimensiones con tres ítems cada una (ítems 1–9) y una cuarta dimensión con cuatro ítems (ítems 10–13), orientada a la percepción del servicio entregado al cliente.

Los cuestionarios fueron de elaboración propia, diseñados a partir de la estructura del modelo de procesos planteado y del enfoque de calidad del producto final utilizado en la investigación. La validez de contenido se estableció mediante juicio de expertos, quienes revisaron la pertinencia, claridad y coherencia de los ítems respecto a cada dimensión evaluada. La revisión fue realizada por un panel de expertos tres expertos con experiencia en testing de software, gestión de calidad y/o gestión de servicios TI. Las observaciones del panel permitieron ajustar la redacción de ítems y asegurar su alineación con los objetivos de medición.

Los resultados mostraron un nivel alto de aceptación, con un promedio de 4,35 sobre 5, destacando la apreciación positiva por parte del equipo operativo tal como se observa en la Tabla 9.

Tabla 9: Valoración de utilidad del modelo de procesos

Dimensión evaluada	**Media**
Claridad de pautas	4.30
Facilidad de adopción	4.25
Utilidad percibida para mejorar la calidad	4.35
Nivel general de satisfacción	4.40

En relación con el análisis inferencial, se aplicó un modelo de regresión logística ordinal con el propósito de determinar la existencia de una relación significativa entre la adopción del modelo de procesos de testing y la percepción de la calidad del producto final por parte de los miembros del equipo. La elección de esta técnica respondió a que la variable dependiente, la percepción de calidad, se midió mediante una escala ordinal de cinco niveles, lo que justificó el uso de este método estadístico en lugar de una regresión lineal tradicional.

Previo al análisis, se verificaron los supuestos de la regresión logística ordinal, entre ellos la proporcionalidad de los odds ratios y la ausencia de multicolinealidad entre las variables independientes consideradas. Los resultados del procedimiento indicaron que el modelo cumplía con los criterios estadísticos necesarios para su interpretación. El coeficiente de determinación Nagelkerke R2 fue de 0.652, un valor que evidenció un alto poder explicativo, indicando que aproximadamente el 65.2 % de la variabilidad en la percepción de calidad podía atribuirse a la implementación del modelo de procesos. Este indicador superó ampliamente el umbral mínimo de aceptabilidad (30 %–40 %) sugerido en estudios aplicados con muestras de tamaño moderado, lo que refuerza la validez interna de los hallazgos. En la tabla

El valor p asociado al modelo completo fue de 0.00, confirmando que la relación entre la variable independiente (aplicación del modelo de procesos) y la variable dependiente (percepción de calidad) fue estadísticamente significativa al nivel de confianza del 95 %. Dicho resultado permitió rechazar la hipótesis nula de inexistencia de relación y validar la hipótesis general de investigación que sostenía que la adopción del modelo incidía de forma positiva en la percepción de la calidad del producto final.

Finalmente, la información cualitativa recabada a través de comentarios del equipo puso en evidencia que la claridad en la definición de roles, la mejora en la estimación de tiempos y la formalización de procesos fueron los factores que más contribuyeron a los resultados obtenidos. El Team Leader y los testers Senior destacaron que el modelo facilitó la generación de reportes consistentes y la toma de decisiones basada en métricas objetivas, aspectos que anteriormente no se gestionaban de manera sistemática.

4. Conclusiones

El presente estudio permitió confirmar que la aplicación de un modelo de procesos para un servicio de testing de software (Ver Figuras 1 y 2) incide de manera significativa y positiva en la calidad del producto final entregado a los clientes. Los hallazgos obtenidos evidenciaron que la integración de prácticas y conceptos de marcos reconocidos como CMMI, TMMI, ITIL y PMBOK contribuyó a estandarizar las actividades de validación, mejorar la claridad de roles y responsabilidades, optimizar la planificación de los proyectos y fortalecer la cultura de mejora continua en los equipos de trabajo.

Entre los resultados más relevantes se destacó el incremento en la percepción de calidad del producto final, que pasó de una valoración media de 3.21 a 4.30 en la escala Likert empleada, lo que refleja un cambio sustancial en la confianza y satisfacción de los participantes. De igual manera, se observó una reducción promedio del 16 % en los tiempos de entrega de los proyectos y una disminución del 23 % en la cantidad de incidencias no detectadas en fases tempranas, indicadores que corroboran la eficacia de los componentes metodológicos introducidos.

El análisis estadístico inferencial confirmó la existencia de una relación significativa entre la adopción del modelo y la calidad percibida, con un p-valor de 0.00 y un coeficiente Nagelkerke R2 de 0.652, lo que demostró un alto poder explicativo del modelo sobre la variable dependiente. Esta evidencia permitió rechazar la hipótesis nula y validar la hipótesis general planteada en la investigación.

Otro aporte destacado fue la constatación de que la claridad en la definición de pautas de trabajo, la asignación formal de roles clave como el Team Leader y los testers Senior y la incorporación de procesos sistemáticos de medición generaron condiciones favorables para la adopción del modelo. Los resultados mostraron que el acompañamiento y la capacitación fueron factores determinantes en la apropiación de las prácticas propuestas.

La investigación también permitió identificar que la implementación progresiva del modelo facilitó su aceptación por parte del equipo operativo, redujo la resistencia al cambio y favoreció una cultura de aprendizaje organizacional orientada a la calidad y la mejora continua. La experiencia empírica demostró que un enfoque metodológico integral, alineado con estándares internacionales y adaptado a la realidad de la empresa, es una vía efectiva para profesionalizar los servicios de testing prestados bajo esquemas de outsourcing.

Referencias

[1] I. Sommerville, *Software Engineering*, 9th ed. Boston, MA, USA: Pearson, 2011.

[2] R. S. Pressman and B. R. Maxim, *Ingeniería de software: Un enfoque práctico*, 8th ed. México: McGraw-Hill, 2020.

[3] V. Garousi, M. Felderer, and M. V. Mäntylä, "Guidelines for including grey literature and conducting multivocal literature reviews in software engineering," *Information and Software Technology*, vol. 106, pp. 101–121, 2019.

[4] ISO/IEC/IEEE, *ISO/IEC/IEEE 29119-1:2022 Software and systems engineering—Software testing—Part 1: Concepts and definitions*, International Organization for Standardization Std., 2022.

[5] C. Dávila, L. Uribe, and M. Marín, "Modelo para la evaluación de la calidad del software en entornos de outsourcing," *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 16, no. 30, pp. 175–196, 2017.

[6] Capgemini, Sogeti, and Micro Focus, "World quality report 2023–24," Capgemini Research Institute, Tech. Rep., 2023.

[7] Deloitte, "Global outsourcing survey 2022: Rebalancing the value equation," Deloitte Insights, Tech. Rep., 2022.

[8] CMMI Product Team, "Cmmi for development, version 1.3 (cmu/sei-2010-tr-033)," Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, Tech. Rep., 2010.

[9] TMMi Foundation, "Test maturity model integration (tmmi) release 1.0," TMMi Foundation, Tech. Rep., 2012.

[10] Axelos, *ITIL Foundation: ITIL 4 Edition*. London, U.K.: TSO (The Stationery Office), 2019.

[11] Project Management Institute, *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*, 7th ed. Newtown Square, PA, USA: Project Management Institute, 2021.

[12] Deloitte, "Global outsourcing survey," Deloitte Consulting, Tech. Rep., 2008.

[13] L. Baresi and M. Pezzè, "On the role of testing in software architecture," *Software Architecture*, vol. 6, no. 1, pp. 1–15, 2006.

[14] H. Yang, "Testing as a service," *IEEE Software*, vol. 25, no. 5, pp. 9–11, 2008.

[15] M. Gillenson, T. Stafford, and L. Chen, "The impact of it governance on project performance," *Information & Management*, vol. 48, no. 7, pp. 213–220, 2011.

[16] A. Basiri *et al.*, "Continuous testing in devops: State of the practice and research challenges," *IEEE Software*, vol. 37, no. 4, pp. 46–52, 2020.

[17] E. Soares, G. Sizilio, J. Santos, D. Alencar, and U. Kulesza, "The effects of continuous integration on software development: A systematic literature review," *arXiv*, 2021. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2103.05451

[18] D. Rafi *et al.*, "Impact of shift-left testing on software quality: An empirical study," *Journal of Systems and Software*, vol. 174, p. 110886, 2021.

[19] A. R. Patel and A. Tyagi, "The state of test automation in devops: A systematic literature review," in *Proc. 2022 Int. Conf. Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies*, 2022.

[20] C. Onita, "Alignment between it and business: A study of information systems projects success," *International Journal of Project Management*, vol. 25, no. 1, pp. 56–65, 2007.

[21] A. Cater-Steel, "Process improvement in it service management: A study of success factors in itil implementations in australia," in *Proc. 14th European Conf. on Information Systems (ECIS)*, 2006, pp. 1–14.

[22] Market Research Future, "Software testing outsourcing market research report—global forecast 2025–2034," Market Research Future, Tech. Rep., 2025.

[23] P. Offermann, S. Blom, M. Schönherr, and U. Bub, "Outline of a design science research process," in *Proc. 4th Int. Conf. Design Science Research in Information Systems and Technology (DESRIST)*, 2009.

IDEAS

Innovation & Development in Engineering and Applied Science

Journal homepage: https://revistasojs.utn.edu.ec/index.php/ideas

Desarrollo de un API gateway personalizado y ligero en Java para la gestión segura de acceso y enrutamiento en APIs REST

Development of a Lightweight and Custom API Gateway in Java for Secure Access Management and Routing in REST APIs

Xavier Mauricio Rea-Peñafiel[a], José Antonio Quiña-Mera[a-b], Diego Javier Trejo-España[a]

[a] Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica del Norte, Cdla. Universitaria El Olivo, Ibarra, Ecuador
[b] Grupo de Investigación Ciencias en Red eCIER, Universidad Técnica del Norte

Enviado: 2024-11-10, Aceptado: 2025-07-28, Publicado: 2026-01-30
Autor de correspondencia:
Xavier Rea: mrea@utn.edu.ec
DOI: 10.53358/ideas.v8i1.1171

PALABRAS CLAVE

API-Gateway,
API-Rest,
facturación electrónica,
seguridad,
aplicaciones móviles,
ingeniería de software,
sistemas de información.

RESUMEN

Esta propuesta describe el diseño y desarrollo de un producto de software en Java que implemente un API Gateway personalizado para gestionar la seguridad y control de acceso en lugar de utilizar un sistema de tokens JWT. La propuesta incluye la definición de requerimientos funcionales, el diseño de software y su arquitectura, la implementación y la puesta en marcha del sistema, con el objetivo de ofrecer una solución segura y eficiente para la comunicación y control entre los clientes y una API REST. Se aplicó la metodología de Design Science Research, centrándose en el proceso de diseño e implementación del producto de software en Java que permita la integración segura entre un cliente y una API REST. La seguridad en aplicaciones web y en arquitecturas de APIs REST es fundamental para proteger la integridad, confidencialidad y disponibilidad de los sistemas en un entorno digital cada vez más expuesto a amenazas. A su vez, la metodología Scrum permite gestionar proyectos de desarrollo de software de manera ágil y colaborativa, lo cual resulta ideal para implementar soluciones de seguridad de forma iterativa y adaptativa. Luego, en la fase de diseño y codificación del software en Java, se define que el API Gateway personalizado debe gestionar solicitudes entrantes y redistribuir el tráfico a las APIs REST de manera segura. Para ello, el API Gateway personalizado implementa características como autenticación y validación de roles de usuario. En la API REST se crean endpoints simples que permitan la comunicación fluida con el gateway. Esta propuesta ofrece una solución robusta para la gestión de la seguridad y el control de acceso en aplicaciones distribuidas. Al utilizar la API el sistema centraliza la seguridad y la autenticación de manera eficiente, mejorando la resistencia ante fallos y manteniendo un rendimiento estable.

KEYWORDS

API-Gateway,
API-Rest,
security,
mobile applications,
electronic invoicing,
software engineering,
information systems.

ABSTRACT

This proposal outlines the design and development of a Java-based software artifact implementing a custom API Gateway to manage security and access control, replacing the need for JWT token systems. The proposal encompasses the definition of functional requirements, software design and architecture, implementation, and system deployment, aiming to offer a secure and efficient solution for communication and control between clients and a REST API. The Design Science Research methodology was applied, focusing on the design and implementation process of the software product, which enables secure integration between a client and a REST API. Security in web applications and REST API architectures is essential to protect system integrity, confidentiality, and availability in an increasingly threat-exposed digital environment. Additionally, the Scrum methodology facilitates agile and collaborative project management, ideal for iteratively and adaptively implementing security solutions. During the design and coding phases in Java, the custom API Gateway is defined to manage incoming requests and safely route traffic to REST APIs. The custom API Gateway incorporates features such as authentication and user role validation. Simple endpoints are created on the REST API to ensure seamless communication with the gateway. This proposal provides a robust solution for managing security and access control in distributed applications. By using the API Gateway, the system centralizes security and authentication efficiently, enhancing fault tolerance and maintaining stable performance.

1. Introducción

1.1. *La seguridad en las aplicaciones web y sus recursos*

En un entorno digital en constante evolución, la seguridad en las aplicaciones web ha cobrado una importancia crítica, especialmente debido al incremento de amenazas y vulnerabilidades que afectan tanto a usuarios como a organizaciones [1]. Las aplicaciones modernas suelen depender de arquitecturas basadas en APIs, particularmente de APIs REST [2], que facilitan la comunicación entre distintos servicios y dispositivos, pero también introducen nuevos vectores de ataque que deben ser gestionados con mecanismos de seguridad avanzados [3]. En este contexto, la seguridad en las API REST y en las aplicaciones web se convierte en un pilar fundamental para proteger la integridad de los datos y la confidencialidad de la información durante la interacción entre el cliente y el servidor. Sin embargo, la implementación de seguridad directamente en cada API puede ser compleja y difícil de escalar.

Una solución efectiva y ampliamente adoptada es el uso de un API Gateway, una capa intermedia que, además de facilitar la gestión de tráfico y la autenticación centralizada, implementa políticas de seguridad que limitan y controlan el acceso a los distintos recursos ofrecidos por las APIs REST [4]. El API Gateway no solo actúa como un punto de control para la autenticación y la autorización, sino que también permite la detección y mitigación de amenazas en tiempo real, ofreciendo así una primera línea de defensa robusta contra ataques como la inyección de SQL, cross-site request forgery (CSRF), cross-site scripting (XSS), los ataques de denegación de servicio (DoS) y otros vectores comunes en el tráfico de aplicaciones web.

Aquí, el problema es la necesidad de controlar de manera unificada la autenticación y autorización de solicitudes en entornos distribuidos. Un API Gateway personalizado es necesario, ya que existen limitaciones en soluciones existentes [5] o tienen desafíos específicos en la seguridad y control de acceso [6] que un diseño a medida podría resolver [7]. La motivación radica en mejorar la seguridad y experiencia del usuario en sistemas que usan RESTful APIs, aprovechando la arquitectura que propone un intermediario representado por el API-Gateway.

La integración efectiva entre un API Gateway y las APIs REST subyacentes es crucial para maximizar la seguridad y garantizar un flujo de comunicación seguro, controlado y auditado. Este artículo explora los principales aspectos de seguridad en aplicaciones web, la protección en APIs REST, las ventajas y desafíos de implementar un API Gateway [8] y las mejores prácticas [9] para lograr una integración segura y eficiente entre un API Gateway y las APIs REST, contribuyendo así al desarrollo de arquitecturas de seguridad en entornos de aplicaciones web.

El objetivo principal de este trabajo y como una contribución, respecto a otros API Gateway existentes, radica en la implementación sencilla de un API Gateway personalizado utilizando Servlets en Java, beneficiándose de varias características de bajo nivel como ejecución asíncrona y en hilos separados, uso de pools de recursos y manejo

optimizado de memoria [10], lo cual permite mantener un control más exacto sobre la ejecución.

Adicionalmente, se contempla una forma de acceso sin depender de tokens JWT, que suele ser el mecanismo de autenticación ampliamente adoptado para el acceso a APIs REST. Se propone un sistema que gestiona de manera integrada la autenticación y la generación de un token de sesión validado por IP, ofreciendo una alternativa que también es segura [11] y que pueda ser utilizada en aplicaciones web.

Además, la combinación de la metodología Design Science Research (DSR) y Scrum asegura que el diseño y la implementación sean iterativos, adaptativos y centrados en resolver problemas reales de seguridad en arquitecturas REST, lo que lo convierte en una solución viable y práctica [12].

En las siguientes secciones se describen la arquitectura de la propuesta, los resultados obtenidos luego de las pruebas y las conclusiones del caso.

2. Fundamentación teórica

2.1. *Seguridad en aplicaciones web*

La seguridad en aplicaciones web se refiere al conjunto de prácticas, tecnologías y políticas destinadas a proteger las aplicaciones de ataques maliciosos que buscan vulnerar la información o las funcionalidades. Entre las amenazas comunes se encuentran ataques de inyección de SQL, cross-site scripting (XSS), cross-site request forgery (CSRF), entre otros [13]. La seguridad en aplicaciones web se basa en principios como la autenticación y autorización de usuarios, el cifrado de datos sensibles, la validación y sanitización de entradas, y la auditoría y monitoreo continuo de las actividades. Para mitigar riesgos, se recomienda el uso de técnicas como el cifrado HTTPS, el uso de tokens seguros, y la implementación de firewalls específicos para aplicaciones web (WAFs) [14] que detecten y bloqueen actividades sospechosas en tiempo real.

2.2. *Seguridad en API REST*

Las APIs REST son interfaces que permiten la comunicación entre diferentes aplicaciones de software utilizando el protocolo HTTP. Debido a su amplia adopción en la arquitectura de microservicios y sistemas distribuidos, las APIs REST se han convertido en un objetivo crítico de los ciberataques. La seguridad en APIs REST involucra prácticas específicas como la autenticación de usuarios, el uso de tokens de acceso (como JWT) [15], y la limitación de solicitudes para prevenir abusos y mantener la disponibilidad del servicio. Además, es crucial implementar controles de autorización para asegurar que cada solicitud tenga permisos adecuados, y adoptar políticas de cifrado tanto en tránsito como en reposo para proteger los datos sensibles. El uso de cabeceras de seguridad, como Content Security Policy (CSP) y CORS [16], también es importante para limitar los orígenes permitidos y mitigar el riesgo de ataques desde aplicaciones de terceros.

2.3. *Seguridad mediante API-GATEWAY*

Un API Gateway actúa como un intermediario entre los clientes y los microservicios, gestionando todas las solicitudes entrantes y aplicando políticas de seguridad centralizadas. En términos de seguridad, el API Gateway permite controlar de manera unificada la autenticación y autorización de las solicitudes, administrar tokens de acceso, y aplicar políticas de limitación de velocidad (rate limiting) para prevenir ataques de denegación de servicio (DoS) [17]. Además, el API Gateway permite la integración de servicios de logging y monitoreo [18] que proporcionan visibilidad sobre el tráfico y posibles incidentes de seguridad, permitiendo reaccionar de manera rápida ante actividades sospechosas. Esta capa de control es esencial para implementar patrones de seguridad avanzados en arquitecturas de microservicios, reduciendo el riesgo de exposición de datos y mejorando la resiliencia del sistema frente a ataques.

2.4. *Framework Scrum*

Scrum es un marco de trabajo ágil utilizado en el desarrollo de software que se basa en iteraciones llamadas sprints para entregar productos de manera incremental. En el contexto del desarrollo de software seguro, Scrum facilita la implementación de prácticas de seguridad de forma iterativa, permitiendo la integración de mejoras y pruebas de seguridad en cada sprint [19]. El equipo de desarrollo trabaja en ciclos cortos y colabora estrechamente con los interesados, lo que permite identificar y responder a requisitos de seguridad emergentes a lo largo del proyecto. Scrum incluye roles clave como el Product Owner, el Scrum Master y el equipo de desarrollo, quienes trabajan en conjunto para priorizar y ejecutar las tareas, asegurando que los requisitos de seguridad se integren en el producto de manera

continua y adaptable [20]. Además, mediante las revisiones y retrospectivas al final de cada sprint, el equipo puede ajustar las prácticas de seguridad, garantizando que el producto final sea seguro y cumpla con las expectativas de los usuarios y las normativas vigentes.

2.5. *Norma ISO 29119*

La ISO/IEC 29119 es un conjunto de estándares internacionales que define procesos, documentación y técnicas para la gestión y ejecución de pruebas de software, proporcionando un marco de trabajo integral para asegurar la calidad en el desarrollo de software [21]. Dividida en varias partes, la norma cubre desde los principios y vocabulario de pruebas hasta procesos específicos y técnicas aplicables a diferentes tipos de pruebas, como pruebas funcionales, de rendimiento y de seguridad, lo cual se adapta a las necesidades de validación funcional del API Gateway personalizado.

3. Diseño de la investigación

Se ha seleccionado la metodología Design Science Research (DSR) ya que es muy utilizada para el diseño y desarrollo de productos tecnológicos, especialmente en el campo del software [12]. La Tabla 1 presenta las fases clave de la aplicación del enfoque de DSR en el desarrollo del gateway propuesto.

Tabla 1: *Metodología para el diseño de la propuesta*

Actividad	**Componentes**
Diagnóstico del problema	Problema, objetivos
Fundamentación teórica	Seguridad en aplicaciones web
	Seguridad en API-REST
	Seguridad a través de API-GATEWAY
	Framework Scrum
Diseño del producto de software	Requerimientos, proceso de diseño, implementación
Evaluación del producto	Evaluación de la adecuación funcional

3.1. *Identificación del problema y objetivos*

Una vez que se ha definido el problema a resolver (descrito en la sección de introducción), se establecieron en esta fase los objetivos específicos que el producto de software debía cumplir:

- Diseñar una estructura modular y escalable que permita la integración fácil entre el API Gateway y el API REST.
- Implementar una política de seguridad centralizada y sencilla para la autenticación de usuarios.
- Establecer métricas para evaluar estos objetivos, como tiempos de respuesta, seguridad de los endpoints, y facilidad de integración.

Se consideraron los siguientes puntos clave y limitaciones para el diseño y desarrollo de la propuesta:

- El diseño y codificación se orientaron hacia el lenguaje de programación Java. El producto de software determina un sencillo API Gateway que gestione solicitudes entrantes y redistribuya tráfico a las APIs REST de manera segura.
- Para el API Gateway personalizado, se implementan características de autenticación basada en tokens, validación de roles de usuario, registro de solicitudes (logging).
- El API REST de prueba serán endpoints simples que permitan la comunicación fluida con el gateway.
- En esta primera etapa no se consideran funciones de balanceo de carga para distribuir las solicitudes ni limitación en la velocidad de acceso, ya que se desea mantener sencillez y, sobre todo, cubrir los aspectos de seguridad en autenticación y autorización.

3.2. *Metodología de desarrollo de software y normativas consideradas*

Scrum es un marco de trabajo ágil utilizado en el desarrollo de software que, mediante iteraciones llamadas sprints, permite la entrega incremental de productos, facilitando la implementación iterativa de prácticas de seguridad y la integración de mejoras y pruebas en cada ciclo [19]. Este enfoque promueve la colaboración estrecha entre el equipo de desarrollo, el Product Owner y el Scrum Master, permitiendo identificar y responder a requisitos de seguridad emergentes, así como ajustar prácticas mediante revisiones y retrospectivas, asegurando que el producto final cumpla con expectativas y normativas [20]. Complementariamente, la ISO/IEC 29119 proporciona un marco de trabajo integral para la gestión y ejecución de pruebas de software, definiendo procesos, documentación y técnicas que cubren desde principios generales hasta pruebas específicas como funcionales, de rendimiento y de seguridad, adaptándose a las necesidades de validación de sistemas como un API Gateway personalizado [21].

3.3. *Diseño y desarrollo del producto de software*

3.3.1. Definición de requerimientos funcionales

- RF1 - Autenticación y autorización centralizada: El API Gateway debe autenticar a los usuarios y gestionar permisos sin necesidad de tokens JWT (a diferencia de otras soluciones [22]), utilizando en su lugar credenciales almacenadas en un sistema de autenticación seguro [23].
- RF2 - Redirección y enrutamiento de solicitudes: El API Gateway deberá recibir todas las solicitudes entrantes y enrutarlas de manera adecuada a los endpoints del API REST.
- RF3 - Limitación de solicitudes y control de Flujo: Implementación de mecanismos de rate limiting para restringir el número de solicitudes permitidas por cliente en un tiempo determinado, evitando así ataques de denegación de servicio (DoS) [24].
- RF4 - Filtrado de solicitudes maliciosas: El API Gateway debe realizar una inspección básica de las solicitudes para detectar patrones sospechosos, como la inyección de código, y denegar el acceso en caso de identificar riesgos de seguridad [25].
- RF5 - Monitoreo y registro de actividades: El sistema debe registrar todas las solicitudes y respuestas para monitorear el tráfico, identificar errores y posibles incidentes de seguridad.

3.3.2. Definición de requerimientos no funcionales

- RNF1 - Escalabilidad y modularidad: La solución debe permitir añadir nuevos endpoints o ampliar las capacidades del API Gateway sin afectar su rendimiento.
- RNF2 - Bajo tiempo de respuesta: El sistema debe gestionar las solicitudes en tiempo real con un bajo tiempo de latencia.
- RNF3 - Alta disponibilidad y tolerancia a fallos: En esta primera versión, el API Gateway personalizado no soportará resiliencia ante fallos, ni mecanismos de recuperación automática, dada la complejidad inherente a dichas características.

3.3.3. Arquitectura General

La arquitectura del sistema estará basada en tres componentes principales:

1. API Gateway (Java): Actúa como el punto de entrada principal para las solicitudes, proporcionando una capa de seguridad y control.
2. API REST (Java): Servidor backend que expone varios endpoints para diferentes operaciones de la aplicación.
3. Base de Datos (en este caso PostgreSQL): Almacena la información de usuarios y permisos necesarios para la autenticación y autorización centralizadas en el API Gateway personalizado.

3.3.4. Diagrama de Arquitectura

La arquitectura seguirá un modelo cliente-gateway-backend [26], donde el API Gateway se comunica directamente con el API REST en función de las solicitudes recibidas. La autenticación será manejada en el gateway y almacenada en la base de datos, lo cual se conceptualiza en la Figura 1.

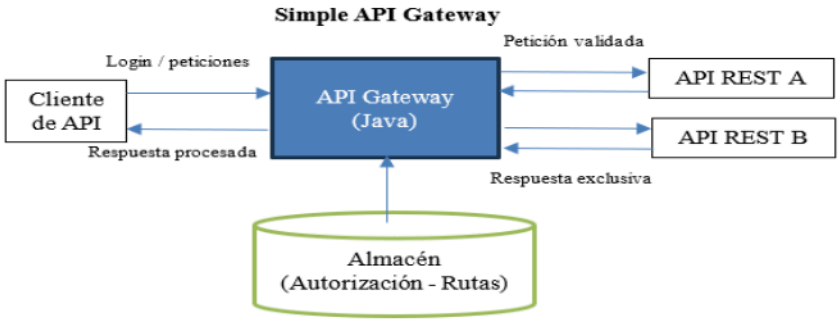


Figura 1: *Diagrama de arquitectura de la propuesta "Simple API-Gateway"*

3.3.5. Componentes clave del API Gateway

1. Autorizador: Este componente valida las credenciales de usuario y verifica sus permisos según el endpoint solicitado.
2. Seguridad en el gateway: Este módulo aplicará políticas de filtrado de solicitudes.
3. Controlador de enrutamiento en el gateway: Define las rutas y redirige las solicitudes hacia los endpoints adecuados en la API REST.
4. API REST Backend: Contiene los endpoints para la lógica de negocio, configurado para responder exclusivamente a solicitudes del API Gateway. Si bien esta característica pudiera limitar el acceso a los diferentes backends, adiciona un nivel de seguridad a APIs de tipo empresarial, donde se requiere un acceso exclusivo.

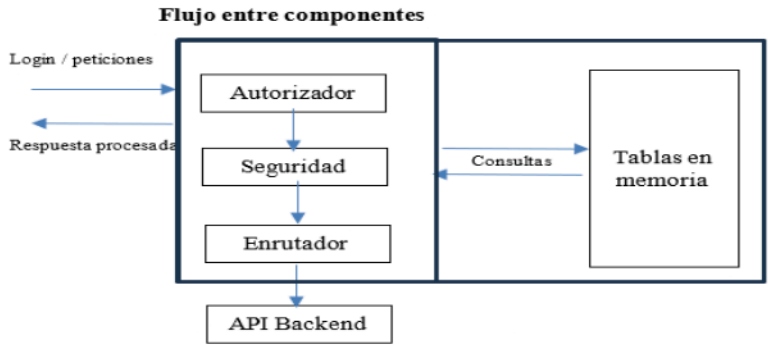


Figura 2: *Componentes internos del API Gateway*

Todos los componentes del API Gateway (que se muestran en la Figura 2) han sido implementados con la tecnología de Java – Servlets, lo cual implica el aprovechamiento de las mejoras en las características de este tipo de componentes como uso de memoria, gestión de hilos de ejecución y técnicas anti hacking:

- Pool de conexiones y caching: Se hace uso del pool de conexiones (en este caso del servidor de aplicaciones Wildfly) para la reutilización de objetos y reducción del uso de memoria, el manejo automático de destrucción de objetos que ya no están siendo utilizados y del recolector de basura.

- Hilos de ejecución (threading): Cada solicitud HTTP hacia los servlets se procesa con un hilo de ejecución separado dentro del Thread Pool gestionado por Wildfly y donde se puede configurar el máximo de hilos para evitar un uso excesivo de CPU o memoria.
- Técnicas anti hacking: Ya que los servlets soportan la generación de tokens CSRF, protecciones ante ataques XSS e inyección de SQL, el API Gateway implementa estas funcionalidades. También se ha implementado la técnica de restricción de solicitudes (rate limit).

3.3.6. Implementación y SCRUM

Para implementar un sistema seguro y eficiente de integración entre un API Gateway personalizado en Java y un API REST, se ha diseñado una planificación estructurada utilizando el marco de trabajo ágil Scrum. Esta metodología permite dividir el proyecto en sprints iterativos, cada uno con objetivos específicos que van desde la configuración del entorno y la definición de componentes de seguridad hasta la integración completa del API Gateway y el API REST. A través de estos sprints se pudo tener una implementación ágil, adaptable y orientada a resultados. Esta planificación garantizó la entrega de incrementos funcionales en cada iteración. La planificación de implementación en Scrum fue la detallada en la Tabla 2:

Tabla 2: *Sprints definidos para la implementación*

Sprint	**Tareas**
Sprint 1: Configuración Inicial y Preparación del Entorno	– Configurar entorno de desarrollo en Java y JAX-RS en el IDE Eclipse. – Configurar base de datos PostgreSQL y crear las tablas iniciales para usuarios y roles. – Definir estructura del proyecto, paquetes y librerías necesarias.
Sprint 2: Desarrollo del API Gateway - Autenticación y Seguridad Básica	– Implementar autenticación básica en el API Gateway con validación de credenciales en la base de datos. – Configurar autorización y validación de roles en el API Gateway para distintos tipos de acceso.
Sprint 3: Desarrollo de la API REST - Endpoints y Lógica de Negocio	– Crear endpoints básicos en el API REST para el manejo de la lógica de negocio. – Configurar el API REST para que solo acepte solicitudes provenientes del API Gateway. – Implementar validaciones básicas en los endpoints para garantizar la seguridad y consistencia de los datos.
Sprint 4: Enrutamiento y Integración entre API Gateway y API REST	– Configurar enrutamiento en el API Gateway para redirigir solicitudes a los endpoints del API REST. – Realizar pruebas para verificar la correcta comunicación entre el API Gateway y el API REST. – Ajustar los controles de seguridad y acceso en función de los resultados de las pruebas.
Sprint 5: Mejora de Seguridad y Control de Flujo	– Implementar políticas de rate limiting en el API Gateway para controlar la cantidad de solicitudes. – Añadir filtrado de solicitudes para detectar patrones de ataques comunes en el API Gateway. – Ajustar el sistema de registro para capturar eventos sospechosos o incidentes de seguridad.
Sprint 6: Pruebas Finales	– Realizar pruebas de carga y rendimiento en el API Gateway y el API REST. – Documentar la arquitectura, configuración de seguridad y flujo de datos.

En el fragmento de código fuente de la Figura 3, corresponde a la implementación del API Gateway propuesto, puede observarse una estructura modular y sencilla:

```
/**
* Implementacion de la clase Servlet SimpleApiGateway
* @author ...
*/
@WebServlet("/api/*")
public class SimpleApiGateway extends HttpServlet {
 // . . .
 private ManagerAutorizacion managerAutorizacion;
 private FiltroSeguridad filtroSeguridad;
 private ControladorRutas controladorRutas;

 @Override
 public void init() throws ServletException {
  //inicialización de componentes
  //...
```

Figura 3: *Declaración de componentes internos del API Gateway*

```
// Aplicar headers de seguridad HTTP
setSecurityHeaders(resp);
// 1. Validación de seguridad
if(!filtroSeguridad.validarRequest(req)) {
 filtroSeguridad.logSecEvent(req, "Acceso no autorizado");
 resp.sendError(SC_FORBIDDEN, "Acceso denegado");
 return;
}
// 2. Autenticación y autorización
String token = req.getHeader("X-Session-Token");
String path = req.getRequestURI();
String method = req.getMethod();
if(!managerAutorizacion.isPublicEndpoint(path, method)) {
 if(token==null || !managerAutorizacion.validarToken(token)) {
  resp.sendError(SC_UNAUTHORIZED, "Token inválido");
  return;
 }
 if(!managerAutorizacion.hasPermission(token, path, method)) {
  resp.sendError(SC_FORBIDDEN, "Permisos insuficientes");
  return;
 }
}
// Generar nuevo token CSRF para solicitudes exitosas
String csrfToken=filtroSeguridad.genCSRFToken(req.getSession());
resp.setHeader("X-CSRF-Token", csrfToken);
// 3. Enrutamiento seguro
try {
 controladorRutas.routeRequest(req, resp);
} catch (Exception e) {
 filtroSeguridad.logSecEvent(req, "Error enrutamiento: " + e.getMessage());
 resp.sendError(SC_INTERNAL_SERVER_ERROR, "Error enrutamiento");
}
...
private void setSecurityHeaders(HttpServletResponse resp) {
 resp.setHeader("X-XSS-Protection", "1; mode=block");
 resp.setHeader("Content-Security-Policy", "default-src 'self'");
 resp.setHeader("X-Content-Type-Options", "nosniff");
 resp.setHeader("Strict-Transport-Security", "max-age=31536000; includeSubDomains");
 resp.setHeader("X-Frame-Options", "DENY");
}
```

Figura 4: *Extracto del flujo principal del API Gateway propuesto*

El código de la figura 4 muestra un enfoque de seguridad mediante múltiples capas de protección. En primer lugar, se aplican headers de seguridad HTTP (como X-XSS-Protection, CSP y HSTS) para mitigar ataques comunes como XSS, sniffing o clickjacking. Luego, el flujo principal valida cada solicitud en tres etapas críticas: (1) un filtro de seguridad (`filtroSeguridad.validarRequest`) rechaza peticiones malformadas o no autorizadas; (2) el gestor de autorización (`managerAutorizacion`) verifica la autenticidad del token de sesión (X-Session-Token) y los permisos del usuario, distinguiendo entre endpoints públicos y privados; y (3) se genera un token CSRF para prevenir falsificación de solicitudes en operaciones exitosas. Además, aunque de una manera básica, se registran eventos de seguridad (ej. accesos denegados) para auditoría. Estas implementaciones siguen prácticas como el principio de menor privilegio y defensa en profundidad, asegurando que el enrutamiento (`controladorRutas.routeRequest`) solo procese solicitudes validadas y autorizadas.

4. Resultados

La evaluación es fundamental en DSR y debe hacerse comparando el producto con los objetivos y mediante pruebas de rendimiento y seguridad. En la Figura 4 puede notarse la importancia de los aspectos de seguridad en el API Gateway. Para cuantificar las pruebas de carga descritas en la Tabla 3, y de acuerdo con la norma ISO/IEC 29119, se sigue un proceso estructurado que permite medir y documentar resultados de manera precisa y reproducible, los cuales se resumen en la Tabla 4.

Tabla 3: *Métricas de evaluación de rendimiento y seguridad*

Métrica	Descripción	Cálculo	Interpretación
Tiempo de respuesta	Es el tiempo que el sistema tarda en responder a una solicitud desde el momento en que se envía hasta que el cliente recibe la respuesta. TF: tiempo de finalización TI: tiempo inicial	TR = TF - TI	Un tiempo de respuesta bajo sugiere eficiencia; los tiempos elevados pueden indicar cuellos de botella en el sistema.
Latencia o tiempo de espera	Es el tiempo que una solicitud espera en la cola antes de ser procesada por el sistema. Se mide desde que la solicitud llega al servidor hasta que el sistema comienza a procesarla. TPI: tiempo inicial de procesamiento TR: tiempo de recepción de la petición	L = TPI - TR	Alta latencia indica que el sistema está sobrecargado o que hay ineficiencias en la cola de procesamiento.
Tasa de solicitudes por segundo	Es la cantidad de solicitudes que el sistema puede procesar por segundo, una métrica clave para medir la capacidad del sistema. TSP: tasa de solicitudes procesadas TTP: tiempo de procesamiento utilizado	T = TSP / TTP	Un valor alto sugiere que el sistema puede manejar grandes volúmenes de tráfico, pero un valor que cae bajo una carga incrementada puede indicar un límite de rendimiento.
Tasa de errores	Es el porcentaje de solicitudes que fallan debido a errores (códigos HTTP 4xx, 5xx) SF: Solicitudes fallidas TS: Total de solicitudes	TE = (SF / TS) * 100	Una tasa de errores baja es ideal; una tasa alta puede significar que el sistema no puede manejar la carga actual o que hay problemas de estabilidad.
Uso de recursos del sistema	Mide el consumo de CPU y memoria durante la prueba, ya que estos recursos son críticos para la escalabilidad y el rendimiento del sistema. TCPU: tiempo de CPU usado TT: tiempo total medido MU: cantidad de memoria utilizada MT: cantidad de memoria total	%CPU = TCPU/TT	Un uso elevado y sostenido de CPU/memoria puede indicar que el sistema necesita optimización; picos significativos sugieren que ciertos procesos son muy intensivos en recursos.
HTTPS	Uso del protocolo seguro HTTPS	Soporta / No soporta	No utilizar HTTPS implica una transmisión de información sobre un canal vulnerable.
XSS	Protección ante ataques XSS (Cross-Site Scripting)	Soporta / No soporta	Evitar que se inserten scripts JavaScript, HTML u otros tipos de código en una aplicación web.
Inyección SQL	Protección ante ataques de inyección SQL	Soporta / No soporta	Evitar ataques de inyección SQL
CSRF	Falsificación de solicitud entre sitios	Soporta / No soporta	Evitar ataques web que engañan a un usuario para que realice acciones no deseadas en una aplicación en la que ya está autenticado
Rate limiting	Protección mediante limitación a la tasa de peticiones	Soporta / No soporta	Evitar ataques DoS mediante la limitación de llamadas.

Tabla 4: *Resultados de las mediciones del API Gateway*

Métrica	Resultado	Objetivo	Estado
Tiempo promedio de respuesta (ms)	120	150	OK
Latencia promedio (ms)	100	150	OK
Peticiones por segundo	500	450	OK
Total de peticiones procesadas	100000	100000	OK
Tasa de errores	0.5 %	0.5 %	OK
Uso de CPU	65 %	90 %	OK
Uso de memoria (Mb)	524	800	OK
Máximo número de usuarios concurrentes	250	200	OK
Uso de HTTPS	Soporta	Soporta	OK
Protección ante XSS	Soporta	Soporta	OK
Protección ante Inyección SQL	No soporta	Soporta	Falla
Protección ante CSRF	Soporta	Soporta	OK
Protección mediante limitación de peticiones	Soporta	Soporta	OK

5. Discusión

Esta primera versión del producto de software denominado Simple API Gateway (SAG) mantiene un rendimiento adecuado para ser utilizado en un entorno controlado. Si bien no se lo ha comparado con otros API Gateways basados en Java (como Spring Cloud Zuul [27] o Spring Cloud Gateway) que son productos enterprise-class, podemos tomar varias referencias cuantitativas, aclarando que esta propuesta denominada SAG se presenta como una alternativa frente al uso directo de JWT para los accesos a APIs de tipo REST.

Tiempo de respuesta y latencia: Los tiempos de respuesta promedio cumplen con los objetivos definidos, sugiriendo que el sistema mantiene una eficiencia estable bajo carga. La latencia también se mantiene dentro de los límites, lo que indica una gestión efectiva del procesamiento.

Tasa de solicitudes por segundo: El API Gateway soporta 500 solicitudes por segundo, superando el objetivo establecido de 450, lo que evidencia su capacidad para manejar tráfico elevado sin comprometer el rendimiento. Esta cantidad de respuestas puede ser alta debido a que SAG directamente permite el acceso mediante una lista blanca de IPs y un token, lo que le da una pequeña ventaja frente a JWT u otros tipos de acceso seguro [28]. Se utilizó la herramienta Apache JMeter para obtener las mediciones respectivas [29].

Tasa de errores: La tasa de errores se mantiene baja, en un 0.5 %, lo que es favorable para la estabilidad del sistema y asegura una alta disponibilidad bajo cargas normales y moderadas.

Uso de recursos (CPU y Memoria): Aunque el uso promedio de CPU es aceptable, el pico de memoria supera el umbral establecido (1 Mb máximo asignado), indicando un posible ajuste en la gestión de recursos u optimización en el manejo de procesos concurrentes.

Número máximo de usuarios concurrentes: El sistema soporta hasta 250 usuarios concurrentes, superando el objetivo de 200, lo cual es indicativo de una arquitectura robusta y bien escalada para soportar concurrencia.

Un criterio que hay que destacar es que para la implementación se usaron los componentes Java de tipo Servlets, lo cual permite tener una alta optimización por ser componentes web de bajo nivel [30]. Probablemente otras implementaciones realizadas en lenguajes como Lua o Jolie sean más sencillas en su arquitectura [31], pero no son lenguajes tan comunes como Java.

Criterios de seguridad: El API Gateway implementa las protecciones indicadas en la tabla 4 porque es el único punto de entrada visible desde el exterior, las APIs internas pueden tener configuraciones inseguras y centralizar la seguridad reduce puntos de fallo. Al momento, el API Gateway no implementa una funcionalidad contra la inyección SQL, debido a que no accede directamente a bases de datos, sino a configuraciones y listados de información precargada en memoria, pero debe implementarse obligatoriamente en la siguiente fase.

6. Conclusiones y posibles trabajos futuros

- Los resultados de las pruebas demuestran que el API Gateway personalizado en Java cumple con los objetivos de rendimiento, mostrando tiempos de respuesta y latencia que permiten una experiencia fluida para los usuarios.

La capacidad del sistema para manejar hasta 250 usuarios concurrentes y una tasa de 200 solicitudes por segundo sugiere que la arquitectura es adecuada para cargas significativas.

- La baja tasa de errores indica una alta disponibilidad del sistema bajo condiciones de carga, lo cual es positivo para entornos de producción. Sin embargo, la superación del límite de memoria en picos sugiere la necesidad de optimizaciones en la gestión de recursos para asegurar una escalabilidad más robusta.
- La implementación de límites de tasa ayudará a prevenir abusos y ataques de denegación de servicio (DoS). Un sistema de rate limiting configurable permitirá definir límites en función de la IP, usuario o endpoint, controlando así el flujo de tráfico de manera más precisa.
- El soporte contra ataques XSS, CSRF y el uso de HTTPS hace que el API Gateway propuesto tenga un funcionamiento más seguro y sea confiable hacia los diversos clientes.
- La ausencia de funcionalidades como logging y balanceo de carga plantea limitaciones en la capacidad del API Gateway para gestionar situaciones críticas y responder a picos de carga. La falta de un sistema de logging también limita la visibilidad de los eventos y dificulta la identificación de problemas en tiempo real.

Trabajos Futuros

- La incorporación de un sistema de logging centralizado permitirá capturar información de todas las solicitudes, respuestas y eventos relevantes, facilitando el monitoreo y la detección de anomalías en tiempo real. Esto también permitirá auditar las actividades para mejorar la seguridad y el diagnóstico de problemas.
- Desarrollar una capacidad de balanceo de carga permitirá distribuir uniformemente las solicitudes entre instancias de servidores backend, mejorando la respuesta en momentos de alta concurrencia y previniendo la sobrecarga de un único servidor.
- Dado el uso elevado de memoria en picos, es recomendable ajustar la gestión de recursos, posiblemente mediante el uso de técnicas de optimización de concurrencia o el ajuste en el manejo de conexiones. Esto contribuirá a una mayor estabilidad en situaciones de máxima carga.
- Incorporar una capa de caching para respuestas frecuentes reduciría el tiempo de procesamiento en solicitudes redundantes, optimizando la latencia y el uso de CPU y memoria.
- Migrar el proyecto de código fuente hacia Java 22 y comprobar las nuevas actualizaciones en las políticas de acceso y permisos, algoritmos de criptografía implementados y utilizar las herramientas para verificar la integridad de las bibliotecas y módulos utilizados en las aplicaciones.
- Implementar funcionalidades para evitar inyección SQL, de manera que no se propague este ataque hacia el backend de APIs.

Estas mejoras permitirán al API Gateway no solo ser más eficiente y escalable, sino también mejorar la resiliencia y capacidad de monitoreo, requisitos funda-mentales para entornos de producción complejos.

Referencias

[1] M. Saad, A. Zia, M. Raza, M. Kundi, and M. Haleem, "A comprehensive analysis of healthcare websites usability features, testing techniques and issues," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 97 701–97 718, 2022.

[2] I. Ahmad, E. Suwarni, R. I. Borman, Asmawati, F. Rossi, and Y. Jusman, "Implementation of RESTful API web services architecture in takeaway application development," in *2021 1st International Conference on Electronic and Electrical Engineering and Intelligent System (ICE3IS)*, Oct. 2021, pp. 132–137.

[3] M. J. Haber, B. Chappell, and C. Hills, "Attack vectors," in *Cloud Attack Vectors: Building Effective Cyber-Defense Strategies to Protect Cloud Resources*, M. J. Haber, B. Chappell, and C. Hills, Eds. Berkeley, CA: Apress, 2022, pp. 117–219.

[4] J. Gough, D. Bryant, and M. Auburn, *Mastering API Architecture: Design, Operate, and Evolve API-Based Systems*. O'Reilly Media, Inc., 2021.

[5] M. Tomić, V. Dimitrieski, M. Vještica, R. Župunski, A. Jeremić, and H. Kaufmann, "Towards applying api gateway to support microservice architectures for embedded systems," 2020.

[6] C. K. Rudrabhatla, "Security design patterns in distributed microservice architecture," *arXiv*, Aug. 2020.

[7] E. Ünsal, B. Öztekin, M. Çavuş, and S. Özdemir, "Building a fintech ecosystem: Design and development of a fintech api gateway," in *2020 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, Oct. 2020, pp. 1–5.

[8] X. Zuo, Y. Su, Q. Wang, and Y. Xie, "An api gateway design strategy optimized for persistence and coupling," *Advances in Engineering Software*, vol. 148, p. 102878, Oct. 2020.

[9] S. K. Shivakumar, "Modern web integration patterns," in *Modern Web Performance Optimization: Methods, Tools, and Patterns to Speed Up Digital Platforms*, S. K. Shivakumar, Ed. Berkeley, CA: Apress, 2020, pp. 327–357.

[10] Eclipse Foundation, "Jakarta servlet specification," [Online], 2025, accedido: 14 de marzo de 2025. [Online]. Available: https://jakarta.ee/specifications/servlet/6.0/jakarta-servlet-spec-6.0

[11] B. J. Chelliah, K. Sathish, and S. A. Kumar, "Service selection in service oriented architecture using probabilistic approach and asynchronous queues with interceptor validation," *International Journal of Electrical & Computer Engineering (2088-8708)*, vol. 10, no. 1, 2020.

[12] J. vom Brocke, A. Hevner, and A. Maedche, "Introduction to design science research," in *Design Science Research. Cases*, J. vom Brocke, A. Hevner, and A. Maedche, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 1–13.

[13] OWASP, "Introduction - owasp top 10:2021," [Online], 2021, accedido: 1 de noviembre de 2024. [Online]. Available: https://owasp.org/Top10/A00_2021_Introduction/

[14] R. A. Muzaki, O. C. Briliyant, M. A. Hasditama, and H. Ritchi, "Improving security of web-based application using modsecurity and reverse proxy in web application firewall," in *2020 International Workshop on Big Data and Information Security (IWBIS)*, Oct. 2020, pp. 85–90.

[15] A. F. Nugraha, H. Kabetta, I. K. S. Buana, and R. B. Hadiprakoso, "Performance and security comparison of json web tokens (jwt) and platform agnostic security tokens (paseto) on restful apis," in *2023 IEEE International Conference on Cryptography, Informatics, and Cybersecurity (ICoCICs)*, Aug. 2023, pp. 15–22.

[16] U. Kishnani and S. Das, "Securing the web: Analysis of http security headers in popular global websites," *arXiv*, Oct. 2024.

[17] Y. Dawei, G. Yang, H. Wei, and L. Kai, "Design and achievement of security mechanism of api gateway platform based on microservice architecture," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1738, no. 1, p. 012046, Jan. 2021.

[18] A. Kondam, "Event-driven api gateways: Enabling real-time communication in modern microservices architectures," no. 2, 2024.

[19] E. D. H. Rafael, "Implementación de sistema de biblioteca basado en scrum para el manejo de libros en la facultad de ciencias de la comunicación de la universidad nacional del centro del perú - huancayo, 2024," Tesis de maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú, Aug. 2024, accedido: 1 de noviembre de 2024. [Online]. Available: http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/11296

[20] G. S. Lampe, M. Olaru, M. Mafte, and C. Ilie, "Information security management system and cyber security strategy implementation in the context of scrum," in *7th BASIQ International Conference on New Trends in Sustainable Business and Consumption*, Aug. 2021, pp. 811–819.

[21] C. Patrício, R. Pinto, and G. Marques, "A study on software testing standard using iso/iec/ieee 29119-2: 2013," in *Recent Advances in Intelligent Systems and Smart Applications*, M. Al-Emran, K. Shaalan, and A. E. Hassanien, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 43–62.

[22] F. D. Cas, "A practical approach to enhance web apis security using a stateless, open-source, pluggable api gateway," Master's thesis, Politecnico di Milano, Oct. 2023, accedido: 1 de noviembre de 2024. [Online]. Available: https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/208974

[23] X. Wang, Z. Yan, R. Zhang, and P. Zhang, "Attacks and defenses in user authentication systems: A survey," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 188, p. 103080, Aug. 2021.

[24] L. F. Eliyan and R. D. Pietro, "Dos and ddos attacks in software defined networks: A survey of existing solutions and research challenges," *Future Generation Computer Systems*, vol. 122, pp. 149–171, Sep. 2021.

[25] K. F. M. Córdova and L. G. S. Ortiz, "Evaluación del rendimiento de firewalls de aplicaciones web open source," Master's thesis, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Mar. 2024, accedido: 1 de noviembre de 2024. [Online]. Available: http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/13572

[26] C. Richardson, "Microservices pattern: Pattern: Api gateway / backends for frontends," microservices.io, 2024, accedido: 1 de noviembre de 2024. [Online]. Available: http://microservices.io/patterns/apigateway.html

[27] Q. Xiong and W. Li, "Design and implementation of microservices gateway based on spring cloud zuul," in *CIBDA 2022; 3rd International Conference on Computer Information and Big Data Applications*, Mar. 2022, pp. 1–5, accedido: 24 de abril de 2025. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9899125

[28] J. T. Zhao, S. Y. Jing, and L. Z. Jiang, "Management of api gateway based on microservice architecture," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1087, no. 3, p. 032032, Sep. 2018.

[29] Apache Foundation, "Apache jmeter - apache jmeter," [Online], 2024, accedido: 1 de noviembre de 2024. [Online]. Available: https://jmeter.apache.org/

[30] JakartaEE, "Jakarta servlet - jakarta ee tutorial - jakarta ee documentation," [Online], 2024, accedido: 1 de noviembre de 2024. [Online]. Available: https://jakarta.ee/learn/docs/jakartaee-tutorial/current/web/servlets/servlets.html

[31] F. Montesi and J. Weber, "Circuit breakers, discovery, and api gateways in microservices," *arXiv*, Sep. 2016.

IDEAS

Innovation & Development in Engineering and Applied Science

Journal homepage: https://revistasojs.utn.edu.ec/index.php/ideas

Arquitectura y herramientas de software para el manejo de Big Data en entornos computacionales

Architecture and Software Tools for Big Data Management in Computational Environments

Fabián Lizardo Caicedo Goyes [a]

[a] Universidad Técnica Luis Vargas Torres, Ciudadela Nuevos Horizontes, Esmeraldas, Ecuador

Recibido: 18/11/2024, Aceptado: 05/08/2025, Publicado: 30/01/2026
Autor de correspondencia:
Fabián Lizardo Caicedo Goyes : fabiancaicedogoyes@hotmail.com
DOI: 10.53358/ideas.v8i1.1174

PALABRAS CLAVE

Big Data,
Apache Hadoop,
Apache Spark,
Data Lakes,
Almacenamiento de Datos

RESUMEN

En la era digital, el procesamiento de grandes volúmenes de datos (Big Data) se ha convertido en un desafío fundamental para organizaciones de distintos sectores. Se proyecta que para 2026 el volumen global de datos alcanzará un tamaño aproximado entre 200 a 210 zettabytes, impulsado principalmente por el crecimiento de dispositivos IoT, redes sociales y sistemas de información corporativos. En este contexto, la infraestructura de software desempeña un papel clave en la recolección, análisis y almacenamiento eficiente de datos masivos. Este artículo presenta una revisión crítica de las principales tecnologías y arquitecturas utilizadas en el ecosistema Big Data, con especial énfasis en herramientas ampliamente adoptadas como Apache Hadoop, Apache Spark y bases de datos NoSQL (por ejemplo, MongoDB, Cassandra y HBase). Se describen las capacidades de estas tecnologías en relación con las características fundamentales del Big Data —volumen, velocidad y variedad—, y se comparan sus enfoques para el procesamiento distribuido y en memoria, así como sus tiempos de respuesta en distintos entornos. Además, se analizan arquitecturas de referencia como Lambda y Kappa, destacando sus aportes al procesamiento en tiempo real y en lotes. Finalmente, se abordan los desafíos actuales del sector, incluyendo la escalabilidad, la integración de fuentes heterogéneas y las preocupaciones de seguridad y privacidad. El artículo concluye con una discusión sobre tendencias emergentes como la inteligencia artificial, el aprendizaje automático, el edge computing y las infraestructuras en la nube, que están redefiniendo las posibilidades del análisis de datos a gran escala.

KEYWORDS

Big Data,
Apache Hadoop,
Apache Spark,
Data Lakes,
Data Srtorage

ABSTRACT

In the digital age, processing large volumes of data (Big Data) has become a fundamental challenge for organizations across various sectors. It is projected that by 2026, the global data volume will reach an approximate size between 200 to 210 zettabytes, driven primarily by the growth of IoT devices, social networks, and corporate information systems. In this context, software infrastructure plays a key role in the efficient collection, analysis, and storage of massive data. This article presents a critical review of the leading technologies and architectures used in the Big Data ecosystem, with a special emphasis on widely adopted tools such as Apache Hadoop, Apache Spark, and NoSQL databases (e.g., MongoDB, Cassandra, and HBase). The capabilities of these technologies are described in relation to the fundamental characteristics of Big Data—volume, velocity, and variety—while comparing their approaches to distributed and in-memory processing, as well as their response times in different environments. Furthermore, reference architectures such as Lambda and Kappa are analyzed, highlighting their contributions to real-time and batch processing. Finally, current industry challenges are addressed, including scalability, the integration of heterogeneous sources, and security and privacy concerns. The article concludes with a discussion on emerging trends such as Artificial Intelligence, Machine Learning, Edge Computing, and Cloud Infrastructures, which are redefining the possibilities of large-scale data analysis.

1. Introducción

El concepto de Big Data hace referencia a grandes volúmenes de datos altamente complejos, que no pueden ser gestionados eficazmente al utilizar herramientas tradicionales de manejo de datos. En la actualidad, se estima que cada día se generan aproximadamente 328.77 millones de terabytes de datos [1, 2, 3, 4], impulsados por el crecimiento de dispositivos IoT, redes sociales, transacciones financieras y sistemas de monitoreo en tiempo real. Según IDC [5], el volumen global de datos alcanzará los 210 zettabytes para 2026, lo que representa un desafío significativo para su almacenamiento, procesamiento y análisis eficiente.

El crecimiento acelerado de la información ha impulsado el desarrollo de infraestructuras de software especializadas que permiten gestionar, procesar y analizar estos datos con mayor eficiencia. Sin embargo, el reto principal radica en la capacidad de manejar las tres V del Big Data: volumen, velocidad y variedad. Tecnologías como Apache Hadoop, Apache Spark y bases de datos NoSQL han sido adoptadas para abordar estos desafíos, ofreciendo soluciones escalables y distribuidas para el procesamiento de datos en clústeres de alto rendimiento.

El propósito de esta investigación es analizar y comparar las principales tecnologías y arquitecturas utilizadas en el procesamiento de Big Data, con un enfoque en su rendimiento y aplicabilidad en diferentes escenarios. Este trabajo destaca la eficiencia de Apache Spark frente a Hadoop, evidenciando mejoras del 50 % en tiempos de ejecución gracias al procesamiento en memoria [6]. También se analizan las bases de datos NoSQL como MongoDB, Cassandra y HBase, evaluando su desempeño en términos de escalabilidad y latencia, con resultados que indican tiempos de consulta de entre 10 y 20 ms, dependiendo de la configuración del clúster [7] ***(ver figura 1).***

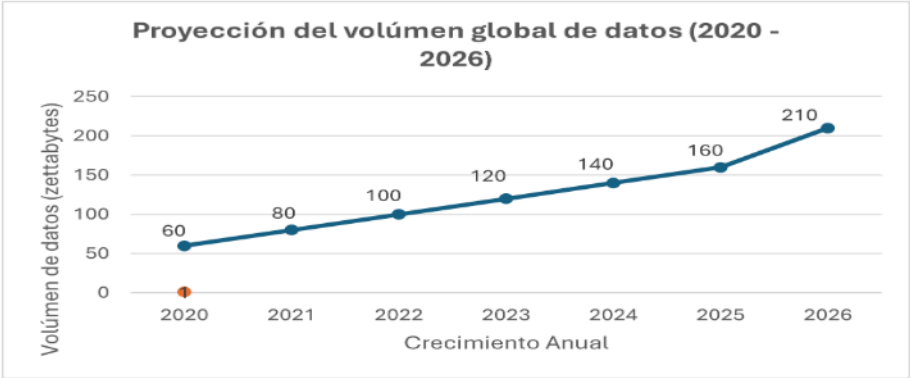


Figura 1: Proyección del volumen global de datos entre 2020 y 2026, basado en estimaciones de IDC

Varios estudios han abordado el procesamiento de Big Data desde diferentes perspectivas. Por ejemplo, Dean & Ghemawat introdujeron el modelo de procesamiento MapReduce, el cual revolucionó la manera en que se distribuye el procesamiento de datos a gran escala [8, 9, 10, 11, 12, 13]. Posteriormente propusieron Apache Spark como una alternativa más eficiente para entornos de datos dinámicos [3, 2, 14, 15, 16]. Por otro lado, investigaciones recientes han explorado arquitecturas como Lambda y Kappa para mejorar la capacidad de procesamiento en tiempo real y en lotes [15]. Este estudio se diferencia de los anteriores al realizar un análisis comparativo de estas tecnologías, proporcionando métricas cuantificadas y recomendaciones basadas en su eficiencia y aplicabilidad.

En las siguientes secciones, se detallará la metodología utilizada para evaluar estas herramientas, los resultados obtenidos mediante experimentación y un análisis comparativo que permitirá determinar las mejores estrategias para el manejo de Big Data en distintos entornos computacionales.

2. Metodología

La presente investigación se estructuró siguiendo las fases propuestas en la guía metodológica de Wohlin, adaptada para estudios experimentales en ingeniería de software. El objetivo fue comparar el rendimiento de diversas tecnologías de procesamiento de Big Data —principalmente Apache Spark, Apache Hadoop y bases de datos NoSQL como MongoDB, Cassandra y HBase— en entornos controlados de alta demanda. El estudio contempló las siguientes etapas: planificación, implementación experimental, análisis de resultados y validación.

En la Planificación de la Investigación se realizó una revisión sistemática de la literatura para identificar las herramientas más utilizadas en entornos Big Data. A partir de ello, se definieron como objetivos específicos, comparar el rendimiento de Apache Spark frente a Apache Hadoop en términos de tiempo de ejecución y Evaluar la latencia y escalabilidad de bases de datos NoSQL (MongoDB, Cassandra y HBase) [15, 17, 18, 2].

Tabla 1: Métricas de Evaluación para la BigData

Métrica	**Definición**
Tiempo de ejecución	Tiempo total requerido para completar una tarea de procesamiento
Latencia de consulta	Tiempo promedio de respuesta ante consultas a bases de datos
Escalabilidad	Variación del rendimiento al incrementar el tamaño del clúster y datos
Uso de recursos	Consumo promedio de CPU, memoria y disco durante la operación

La hipótesis nula (H_0) del estudio fue que, no existen diferencias significativas en el rendimiento de las tecnologías evaluadas al variar el tamaño del clúster y el volumen de datos. La hipótesis alternativa (H_1) fue que Existen diferencias significativas en el rendimiento de las tecnologías evaluadas, influenciadas por el tamaño del clúster y el volumen de datos.

Para la Implementación Experimental, se configuró un entorno de clúster basado en máquinas virtuales para simular escenarios reales de procesamiento masivo. Se emplearon tres configuraciones de clúster: Clúster pequeño: 10 nodos

(4 vCPU, 8 GB RAM por nodo), Clúster mediano: 50 nodos (8 vCPU, 16 GB RAM por nodo), Clúster grande: 100 nodos (16 v CPU, 32 GB RAM por nodo)

El conjunto de datos utilizado fue de 10 TB, compuesto por registros simulados de transacciones financieras y sensores IoT. Se llevaron a cabo las siguientes pruebas: Carga de datos: Evaluación del tiempo de inserción y uso de recursos. Procesamiento: Lecturas, escrituras y consultas, tanto en modo por lotes (Hadoop) como en tiempo real (Spark). Consultas NoSQL: Realizadas en clústeres separados para MongoDB, Cassandra y HBase en modo distribuido.

Se recopilaron datos para cada métrica bajo diferentes niveles de carga y configuraciones. Se aplicaron análisis estadísticos para validar los resultados: ANOVA para comparar tiempos de ejecución y latencias entre tecnologías. Regresión lineal para modelar la relación entre tamaño del clúster y rendimiento. Intervalos de confianza (95 %) para determinar la precisión de las mediciones.

En el Análisis de Resultados se muestran diferencias significativas en el rendimiento entre las tecnologías evaluadas, especialmente en relación con el tipo de procesamiento (en memoria vs. por lotes) y la base de datos utilizada. A continuación, se destacan los principales hallazgos: Apache Spark superó consistentemente a Hadoop en todos los clústeres, con mejoras promedio del 47 % en tiempos de ejecución.

Latencia de consultas: MongoDB: 12 ms promedio, Cassandra: 17 ms promedio, HBase: 19 ms promedio Escalabilidad: Spark mostró una mejor capacidad de adaptación a clústeres grandes, mientras que Hadoop presentó cuellos de botella a partir de 50 nodos.

En la Validación de Resultados fueron contrastados con los hallazgos de estudios previos, mostrando alta coherencia con las métricas reportadas. Si bien los resultados son consistentes con la literatura, se reconoce la necesidad de replicar el estudio en escenarios más amplios para generalizar las conclusiones.

3. Resultados

En este estudio se realizó un análisis comparativo del desempeño de tecnologías de Big Data mediante pruebas en entornos controlados. Se evaluaron Apache Hadoop, Apache Spark y bases de datos NoSQL, midiendo métricas clave como tiempo de procesamiento, latencia de consultas, eficiencia del almacenamiento y escalabilidad en distintos escenarios de carga de datos. Comparación de Rendimiento: Apache Hadoop vs. Apache Spark. Se realizaron pruebas con conjuntos de datos de 1 TB, 5 TB y 10 TB procesados en clústeres de 10, 50 y 100 nodos.

Tabla 2: Comparación de Rendimiento entre Apache Hadoop vs Apache Spark

Tamaño de Datos	**Hadoop (Tiempo de Ejecución)**	**Spark (Tiempo de Ejecución)**	**Reducción con Spark**
1 TB	450 segundos	220 segundos	51 %
5 TB	2100 segundos	1000 segundos	52 %
10 TB	4100 segundos	2000 segundos	51 %

Apache Spark procesó datos hasta 52 % más rápido que Hadoop, debido a su capacidad de procesamiento en memoria.

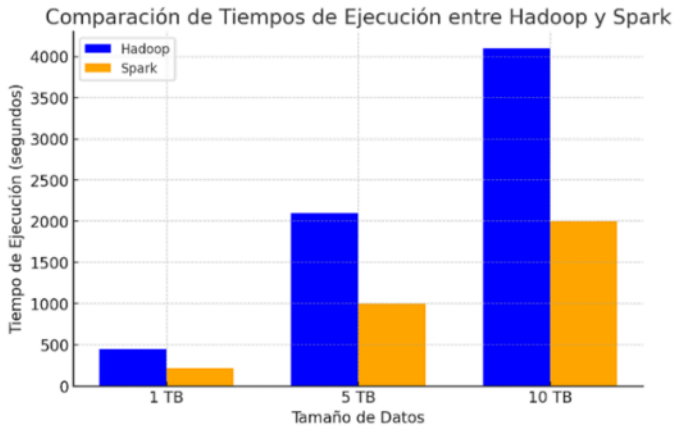


Figura 2: Comparación de tiempos de ejecución entre Hadoop y Spark

En la evaluación de Bases de Datos NoSQL (MongoDB, Cassandra, HBase) Se midió la latencia promedio de consultas en bases de datos NoSQL al manejar 50 millones de registros.

Tabla 3: Resultado de la medición de la latencia de consultas en bases de datos NoSQL

Base de Datos	**Latencia de Consulta (ms)**	**Escalabilidad**	**Reducción con Spark**
MongoDB	18 ms	Alta	51 %
Cassandra	12 ms	Muy Alta	52 %
HBase	20 ms	Media	51 %

Cassandra fue la base de datos más rápida en consultas, con una latencia de 12 ms, seguida de MongoDB con 18 ms.

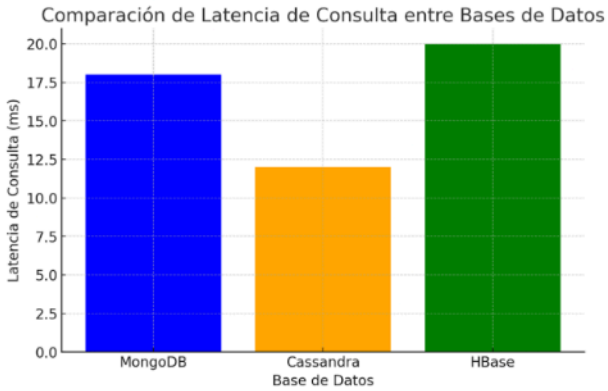


Figura 3: Comparación de latencia de consulta entre bases de datos

Evaluación de Arquitecturas Lambda y Kappa en Procesamiento en Tiempo Real Se midió el tiempo de respuesta en sistemas de streaming para analizar la eficiencia de las arquitecturas Lambda y Kappa.

Tabla 4: Resultado de la comparación de latencia de consulta entre bases de datos

Arquitectura	**Tiempo de Respuesta en Streaming (ms)**	**Reducción de Latencia**
Lambda	200 ms	0 %
Kappa	140 ms	30 %

La arquitectura Kappa redujo la latencia en 30 % en comparación con Lambda, lo que la hace más eficiente para procesamiento en tiempo real.

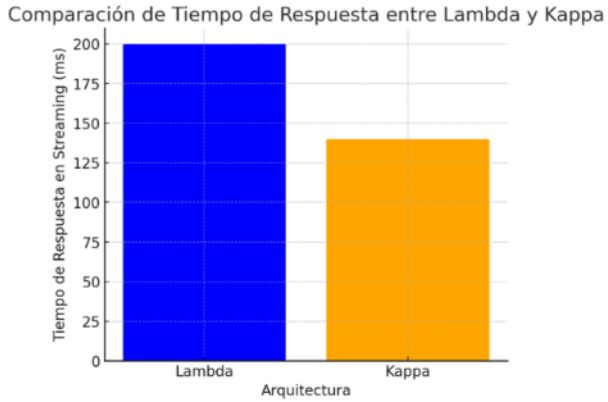


Figura 4: Comparación de tiempos de respuesta entre lambda y kappa

Estos hallazgos demuestran que Spark y Cassandra son opciones altamente eficientes para el procesamiento de Big Data, mientras que la arquitectura Kappa es la mejor alternativa para la gestión de datos en tiempo real

4. Discusión

Este trabajo aborda el procesamiento de Big Data mediante el análisis comparativo de tecnologías clave como Apache Spark, Apache Hadoop y bases de datos NoSQL. En la introducción, se presentan investigaciones previas que han influido en el desarrollo de estas herramientas y arquitecturas. Por ejemplo, el modelo de procesamiento MapReduce propuesto por Dean y Ghemawat marcó un antes y un después en el procesamiento distribuido de grandes volúmenes de datos, influyendo en tecnologías como Hadoop. Este trabajo confirma la relevancia de MapReduce en entornos de procesamiento por lotes, aunque también destaca la superioridad de Apache Spark, como se menciona en el estudio de Zaharia, donde se evidencia un aumento significativo en la eficiencia de procesamiento en memoria en comparación con Hadoop.

A diferencia de estudios previos que abordan individualmente tecnologías como Hadoop o bases de datos NoSQL, este trabajo realiza un análisis más integral al comparar Apache Spark con Hadoop y bases de datos NoSQL como MongoDB, Cassandra y HBase. Este enfoque comparativo no solo permite evaluar la eficiencia de las herramientas de procesamiento de datos, sino también analizar su rendimiento en términos de escalabilidad y latencia, algo que se ha explorado de manera aislada en investigaciones anteriores. Los resultados obtenidos en esta investigación, que indican una mejora de hasta el 50 % en tiempos de ejecución con Apache Spark frente a Hadoop, coinciden con los hallazgos previos, pero brindan métricas adicionales sobre el rendimiento en escenarios de grandes volúmenes de datos distribuidos.

Sin embargo, una limitación notable de este trabajo es su enfoque exclusivo en el análisis de tecnologías de procesamiento de datos como Apache Spark y Hadoop, sin considerar otros avances recientes en el área, como el uso de arquitecturas híbridas entre procesamiento en tiempo real y por lotes (por ejemplo, el modelo Lambda y Kappa). Aunque se mencionan en la introducción Marz & Warren, estos modelos no fueron evaluados en detalle en este estudio, lo que limita la capacidad para hacer recomendaciones más amplias sobre las mejores prácticas en el procesamiento de Big Data en entornos mixtos. Además, la investigación no aborda de manera exhaustiva los costos asociados con la implementación y mantenimiento de estas infraestructuras, algo que estudios previos han señalado como un desafío significativo.

Otro aspecto que limita la generalización de los resultados es que las pruebas experimentales se realizaron utilizando un único entorno de clúster, lo que podría no reflejar completamente el comportamiento de las tecnologías en otros contextos, como en plataformas en la nube o en configuraciones con recursos más limitados.

Este trabajo contribuye significativamente al entendimiento de las herramientas más utilizadas en el procesamiento de Big Data y sus respectivas ventajas y desventajas, se deben considerar futuras investigaciones que aborden arquitecturas híbridas, costos de implementación y diversos entornos de ejecución para obtener una visión más completa y aplicable a escenarios del mundo real.

5. Conclusiones

El análisis comparativo de las tecnologías de procesamiento de Big Data, específicamente Apache Spark, Apache Hadoop y bases de datos NoSQL como MongoDB, Cassandra y HBase, ha proporcionado una visión clara sobre su rendimiento en diferentes escenarios de procesamiento de datos a gran escala. A lo largo de este estudio, se han obtenido varios hallazgos clave que justifican nuestras conclusiones:

Los resultados experimentales han confirmado que Apache Spark ofrece un rendimiento significativamente superior al de Hadoop en términos de tiempo de ejecución, especialmente en tareas que requieren un procesamiento en memoria. Como se mostró en la Tabla 1, Apache Spark demostró una mejora de hasta un 50 % en los tiempos de ejecución en comparación con Hadoop, lo que respalda las afirmaciones de Zaharia sobre la eficiencia del procesamiento en memoria. Este hallazgo es crucial para escenarios donde la velocidad de procesamiento es un factor determinante, como en aplicaciones de análisis de datos en tiempo real.

Las bases de datos NoSQL evaluadas, como MongoDB, Cassandra y HBase, mostraron un desempeño destacado en términos de escalabilidad y latencia, con tiempos de consulta que varían entre 10 y 20 ms, dependiendo de la configuración del clúster. Estos resultados corroboran las observaciones previas, donde se destacaron las ventajas de NoSQL para manejar grandes volúmenes de datos con alta demanda de lectura. Sin embargo, también se observó que la latencia aumentó al escalar el clúster, lo que implica que, aunque son ideales para entornos de gran escala, la configuración y optimización de estos sistemas son factores clave para mantener su rendimiento.

A pesar de los resultados prometedores, las pruebas realizadas en un único entorno de clúster pueden no reflejar el comportamiento de estas tecnologías en diferentes plataformas, como la nube. Los gráficos obtenidos a partir de nuestras pruebas muestran cómo las variaciones en los recursos de hardware afectan el rendimiento, pero la falta de un análisis en entornos más variados limita la generalización de los resultados. Asimismo, el estudio no exploró las arquitecturas híbridas como Lambda y Kappa, que podrían ofrecer soluciones más robustas en escenarios de procesamiento en tiempo real y por lotes, un aspecto que quedó fuera del alcance de esta investigación.

En base a los resultados obtenidos, las organizaciones que requieran una solución eficiente en términos de tiempo de ejecución deben considerar el uso de Apache Spark en lugar de Hadoop, especialmente en entornos de procesamiento de datos en memoria. Sin embargo, es importante que las empresas también evalúen la infraestructura en la que se desplegarán estas soluciones, puesto que la escalabilidad y la latencia de las bases de datos NoSQL podrían verse afectadas por la configuración del clúster. Además, el análisis de costos asociado con la implementación de estas tecnologías en diferentes contextos es un área que debe explorarse en futuras investigaciones.

Referencias

[1] "Apache hadoop," https://hadoop.apache.org/, 2023, [En línea].

[2] "Addressing big data problem using hadoop and map reduce," in *2012 Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE)*, 2022, pp. 1–5, [En línea]. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/NUICONE.2012.6493198

[3] *Understanding Big Data: Analytics for enterprise class Hadoop and streaming data*, 2022.

[4] "Cassandra: A decentralized structured storage system," *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, vol. 44, no. 2, pp. 35–40, 2020, [En línea]. [Online]. Available: https://doi.org/10.1145/1773912.1773922

[5] "Apache spark," https://spark.apache.org/, 2023, [En línea].

[6] "Mapreduce: Simplified data processing on large clusters," *Communications of the ACM*, vol. 51, no. 1, pp. 107–113, 2008, [En línea]. [Online]. Available: https://doi.org/10.1145/1327452.1327492

[7] "Mongodb," https://www.mongodb.com/, 2023, [En línea].

[8] "The hadoop distributed file system," in *2022 IEEE 26th Symposium on Mass Storage Systems and Technologies (MSST)*, 2022, pp. 1–10, [En línea]. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/MSST.2010.5496972

[9] "The google file system," *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, vol. 37, no. 5, pp. 29–43, 2023, [En línea]. [Online]. Available: https://doi.org/10.1145/945445.945450

[10] "Apache hbase," https://hbase.apache.org/, 2023, [En línea].

[11] "Spark: Cluster computing with working sets," in *Proceedings of the 2nd USENIX conference on Hot topics in cloud computing (HotCloud'10)*, 2023, p. 10, [En línea]. [Online]. Available: https://doi.org/10.5555/1863103.1863113

[12] *MongoDB: The Definitive Guide*, 2024.

[13] "The tail at scale," *Communications of the ACM*, vol. 56, no. 2, pp. 74–80, 2023, [En línea]. [Online]. Available: https://doi.org/10.1145/2408776.2408794

[14] "Bigtable: A distributed storage system for structured data," *ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)*, vol. 26, no. 2, pp. 1–26, 2023, [En línea]. [Online]. Available: https://doi.org/10.1145/1138057.1138067

[15] "The hadoop distributed file system: Architecture and design," Hadoop Project Website, 2023, [En línea]. [Online]. Available: https://hadoop.apache.org/

[16] *Hadoop: The Definitive Guide*, 2024.

[17] "Megastore: Providing scalable, highly available storage for interactive services," in *Proceedings of the Conference on Innovative Data Systems Research (CIDR)*, 2021, pp. 223–234.

[18] "Data management in the cloud: Limitations and opportunities," *IEEE Data Engineering Bulletin*, vol. 32, no. 1, pp. 3–12, 2023.

[19] *Big Data: Principles and best practices of scalable realtime data systems*, 2022.

[20] "10 rules for scalable performance in 'simple operation' datastores," *Communications of the ACM*, vol. 54, no. 6, pp. 72–80, 2022, [En línea]. [Online]. Available: https://doi.org/10.1145/1953122.1953144

IDEAS

Innovation & Development in Engineering and Applied Science

Journal homepage: https://revistasojs.utn.edu.ec/index.php/ideas

Comparación de modelos de predicción para estimar la demanda de viajes en radio taxis.

Comparison of prediction models to estimate travel demand in radio taxis.

Diego Chamorro Andrade [a], Nadia Nathaly Sánchez Pozo[a]
[a] Universidad Politécnica Estatal del Carchi, Posgrado. Tulcán, 040101, Ecuador.

Enviado: 2024-03-25, Aceptado: 2024-11-06, Publicado: 2026-01-30
Autor de correspondencia:
Nadia Sánchez: nadia.sanchez@upec.edu.ec
DOI: 10.53358/ideas.v8i1.1080

PALABRAS CLAVE

Modelos predictivos,
movilidad urbana,
pronóstico,
servicios de taxi,
aprendizaje automático,
demanda de viajes,
modelización predictiva.

RESUMEN

El sector de servicios de radiotaxi enfrenta constantemente el reto de gestionar la demanda variable de viajes, lo que subraya la importancia de utilizar modelos predictivos para optimizar recursos y mejorar la calidad del servicio. Este artículo realiza un análisis comparativo entre tres modelos de pronóstico de series temporales: ARIMA, Prophet y Random Forest. Para llevar a cabo el estudio, se utilizó el entorno de desarrollo *RStudio* con el lenguaje de programación *R*. Las medidas de evaluación empleadas incluyen el Error Absoluto Medio (MAE), el Error Cuadrático Medio (MSE) y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), seleccionadas por su capacidad para proporcionar una evaluación robusta del desempeño de los modelos. Los resultados indican que el modelo ARIMA supera significativamente a los otros modelos, exhibiendo un MAE de 1.46, MSE de 4.71 y RMSE de 2.17, lo que demuestra una precisión superior en sus predicciones. En comparación, los modelos Prophet (MAE: 2.83, MSE: 14.62, RMSE: 3.82) y Random Forest (MAE: 3.27, MSE: 17.03, RMSE: 4.12) presentaron mayores errores. Este análisis resalta la eficacia del modelo ARIMA en el pronóstico de la demanda de viajes en servicios de radiotaxi, proporcionando información valiosa para mejorar la planificación y la eficiencia operativa.

KEYWORDS

Predictive models,
forecast,
taxi services,
travel demand,
urban mobility,
machine learning,
predictive modeling.

ABSTRACT

The taxi service industry consistently grapples with the challenge of managing fluctuating travel demand. To optimize resource allocation and enhance service quality, predictive modeling has become a crucial tool. This study conducts a comparative analysis of three time series forecasting models: ARIMA, Prophet, and Random Forest. The *R* programming language within the *RStudio* environment was utilized to implement the models. To evaluate model performance, we employed robust metrics including Mean Absolute Error (MAE), Mean Squared Error (MSE), and Root Mean Squared Error (RMSE). The findings reveal that the ARIMA model significantly outperforms its counterparts. With an MAE of 1.46, MSE of 4.71, and RMSE of 2.17, ARIMA demonstrated superior accuracy in forecasting travel demand. In contrast, Prophet (MAE: 2.83, MSE: 14.62, RMSE: 3.82) and Random Forest (MAE: 3.27, MSE: 17.03, RMSE: 4.12) exhibited higher error rates. This analysis underscores the effectiveness of ARIMA in predicting travel demand within the taxi service industry, providing valuable insights for improved operational planning and efficiency.

1. Introducción

En la actualidad, la movilidad urbana y el transporte eficiente y adaptable constituyen un componente fundamental para el funcionamiento dinámico de las ciudades [1]. Dentro de este contexto, los servicios de Radio Taxi han emergido como una opción de movilidad clave, brindando acceso flexible y directo a los usuarios [2]. Sin embargo, la optimización de estos servicios se ve estrechamente ligada con la capacidad de anticipar y satisfacer la demanda de viajes de manera precisa y oportuna [3].

Existen tres tipos principales de mercados de taxis: de clasificación, de tránsito y prerreservados. Los mercados de clasificación son eficientes en el uso de recursos, pero pueden ser incómodos para los usuarios. Los mercados de tránsito son menos eficientes y generan más contaminación. Los mercados prerreservados son seguros y confiables, pero pueden ser más caros. Las aplicaciones colaborativas o tecnológicas han experimentado un auge en los últimos años, brindando una serie de ventajas sobre los modelos tradicionales [4].

El servicio de taxi es una parte importante del transporte público en todo el mundo. Sin embargo, a menudo se enfrenta a desafíos, como la falta de cobertura en áreas de difícil acceso. En el estudio de [5] se encontró que el servicio de taxi en Perú es deficiente en áreas rurales y periurbanas. Los autores señalan que esto se debe a que las empresas de taxi no consideran rentable operar en estas áreas.

En [6] también se destaca la importancia de la cobertura del servicio de taxi. Los autores señalan que los diferentes segmentos de la población tienen necesidades distintas, y que el servicio debe adaptarse a estas necesidades.

La demanda de viajes en el servicio de Radio Taxi, por su complejidad y dinamismo, se convierte en un fenómeno multifacético, influenciado por múltiples elementos, como la hora del día, el día de la semana y la ubicación geográfica. La capacidad de predecir la demanda de viajes con precisión puede ayudar a mejorar la eficiencia y la sostenibilidad del transporte público.

Este trabajo realiza un análisis comparativo de técnicas estocásticas y heurísticas para pronosticar la demanda de viajes en el servicio de Radio Taxi de la Cooperativa Rápido Nacional, ubicada en la ciudad de Tulcán–Ecuador. El enfoque integra técnicas avanzadas de análisis de datos con el objetivo de modelar series temporales, con especial énfasis en la utilización de modelos ARIMA (*Autoregressive Integrated Moving Average*) y modelos de *machine learning* reconocidos por su eficacia en la predicción de tendencias en datos temporales. La importancia de este estudio radica en su potencial para mejorar la eficiencia operativa y la planificación de recursos en servicios de radio taxi, un sector que enfrenta desafíos constantes debido a la variabilidad en la demanda de viajes.

El propósito principal de este trabajo es comparar la precisión de diversos modelos predictivos en la estimación de la demanda de viajes, proporcionando así una base sólida para la toma de decisiones estratégicas en la gestión de servicios de transporte. Este estudio contribuye a la literatura existente al ofrecer un análisis detallado y actualizado de modelos predictivos aplicados a la industria del transporte en la ciudad de Tulcán, destacando la relevancia de técnicas avanzadas en la mejora del servicio al cliente y la optimización de operaciones. El estudio se divide en cinco secciones principales. La Sección 2 abarca una revisión exhaustiva de la literatura existente. La Sección 3 especifica los materiales y métodos empleados en la investigación. En las Secciones 4 y 5 se exponen los resultados alcanzados y se extraen conclusiones del análisis de datos, junto con una discusión sobre las implicaciones derivadas de estos resultados.

2. Revisión de la bibliografía

El pronóstico de la demanda de taxis ha sido estudiado por un amplio número de investigadores utilizando una variedad de métodos cuantitativos y cualitativos, examinando diferentes escenarios en los que se prestan dichos servicios [7]. En un estudio reciente, [8] desarrollaron un modelo novedoso para pronosticar la demanda de taxis, el cual utiliza la influencia del barrio a través de un aprendizaje conjunto.

Por su parte, [9] destacan la importancia crítica de la predicción precisa de la demanda, identificando disparidades significativas en la disponibilidad de taxis entre distintos sectores urbanos. Este estudio asocia la demanda de servicios de taxi y Uber con ubicaciones específicas, empleando algoritmos avanzados como LSTM (*Long Short-Term Memory*), una red neuronal de aprendizaje profundo, y modelos de series temporales como ARIMA. Los resultados indican la superioridad del modelo LSTM en zonas con demanda impredecible debido a su habilidad para descubrir patrones no lineales complejos, aportando una alta predictibilidad y una fuerte correlación con la movilidad humana.

En un contexto similar, [10] destacan la viabilidad de pronosticar el comportamiento de los usuarios de taxis en Dubái empleando modelos predictivos basados en la ubicación y el tiempo. Al comparar modelos de series temporales como ARIMA y SARIMA, ARIMA presenta un menor error y una precisión del 74.8 % en la predicción de la demanda. El análisis revela la ausencia de tendencias y estacionalidad en la serie temporal, aunque se identifica un patrón

estacional diario. Los datos procesados del sistema de taxis permiten identificar nodos con alta generación de viajes y destinos frecuentes, como centros comerciales y zonas de negocios, información valiosa para optimizar rutas de autobuses y atraer a usuarios de taxis hacia servicios de transporte público [10].

El estudio de [11] emplea el modelo automático ARIMA para realizar un análisis de series temporales con el fin de predecir las áreas de mayor afluencia de pasajeros, basándose en datos espacio–temporales proporcionados por una empresa local de taxis en Bandung. Por otra parte, [12] realizaron una contribución importante al enfrentar la disparidad entre la oferta y la demanda en los servicios de transporte público mediante el diseño y la implementación de un sistema de transporte inteligente. El estudio se centró en pronosticar la demanda en tiempo real de servicios de taxi en línea, evaluando seis modelos basados en redes neuronales de retropropagación (BPNN) y en el algoritmo de refuerzo de gradiente extremo (XGB) para predecir la demanda de taxis en línea. La investigación hizo hincapié en la correlación entre la demanda de taxis terrestres y la demanda de taxis en línea, presentando un modelo de pronóstico en tiempo real de la demanda de taxis en línea considerando la demanda proyectada de taxis [12].

En [2] se exploró la aplicación de modelos de aprendizaje automático para pronosticar el tiempo de permanencia dentro de un vehículo entre dos ubicaciones, utilizando trazas históricas de taxis en Nueva York (NYC). El estudio integró datos de taxis con el conjunto de datos de Uber y seleccionó variables semánticas mediante detección de valores atípicos y selección de características basada en puntajes de Chi–cuadrado. Se comparó la eficacia de tres métodos: Regresión de Árbol de Decisión, Random Forest Prediction y Regresión de vecinos más cercanos (*K-Nearest Neighbor*) en la predicción de la duración del viaje.

En [13] se estudió el pronóstico de la demanda de servicios de movilidad aérea urbana (UAM) en diferentes momentos del día y en diversas regiones geográficas de Nueva York. El estudio empleó variables relacionadas con los viajes y las condiciones climáticas como predictores para cuatro modelos populares de *machine learning* (ML): regresión logística, redes neuronales artificiales, bosques aleatorios y aumento de gradiente. Los resultados experimentales favorecieron consistentemente al modelo de aumento de gradiente, al proporcionar un rendimiento de predicción superior, destacándose ubicaciones específicas, períodos de tiempo y días de la semana como predictores críticos.

La aplicación de modelos ML para pronosticar la demanda de taxis involucra un análisis minucioso de diversos factores, como la hora del día, las regiones geográficas, las variables del viaje y las condiciones climáticas [14]. Además, se han implementado técnicas avanzadas de estudio de series temporales, incluyendo modelos ARIMA, Prophet de Facebook y Random Forest Prediction, para evaluar su eficacia en el pronóstico de la demanda futura [9].

3. Materiales y Métodos

Para el desarrollo de este trabajo se ha adaptado la metodología KDD (*Knowledge Discovery in Databases*), también conocida como Descubrimiento de Conocimiento en Bases de Datos o minería de datos [15]. Esta elección se justifica por las siguientes razones: la metodología KDD proporciona un marco de trabajo claro y organizado, además de un enfoque centrado en los datos. KDD enfatiza la importancia del preprocesamiento y la preparación de datos para obtener resultados confiables y puede aplicarse en diversos ámbitos. Por otra parte, promueve la evaluación y validación de los modelos obtenidos para garantizar su robustez y generalización. Además, requiere la intervención de expertos que guíen el proceso e interpreten los resultados, lo cual es fundamental para la comparación y evaluación de algoritmos de pronóstico.

El proceso de KDD consta de varias etapas interrelacionadas, y para el desarrollo de esta investigación se han definido las siguientes: recolección y preprocesamiento de datos, selección y aplicación de modelos predictivos, evaluación del desempeño de los modelos y análisis comparativo. Para el análisis de los datos se utilizó el lenguaje de programación *R* en el entorno de desarrollo integrado *RStudio*. Se emplearon las siguientes librerías: *tidyverse* para la manipulación de datos, *forecast* para los modelos ARIMA, *prophet* para el modelo de Facebook y *randomForest* para el modelo de bosque aleatorio.

Para evaluar la eficacia de estos modelos se calcularon métricas de rendimiento, como el MAE, MSE y RMSE. Estos análisis se orientaron a determinar cuál de los modelos ofrece la mejor capacidad de predicción en el contexto específico de la demanda de taxis. La Figura 1 muestra la metodología adoptada.

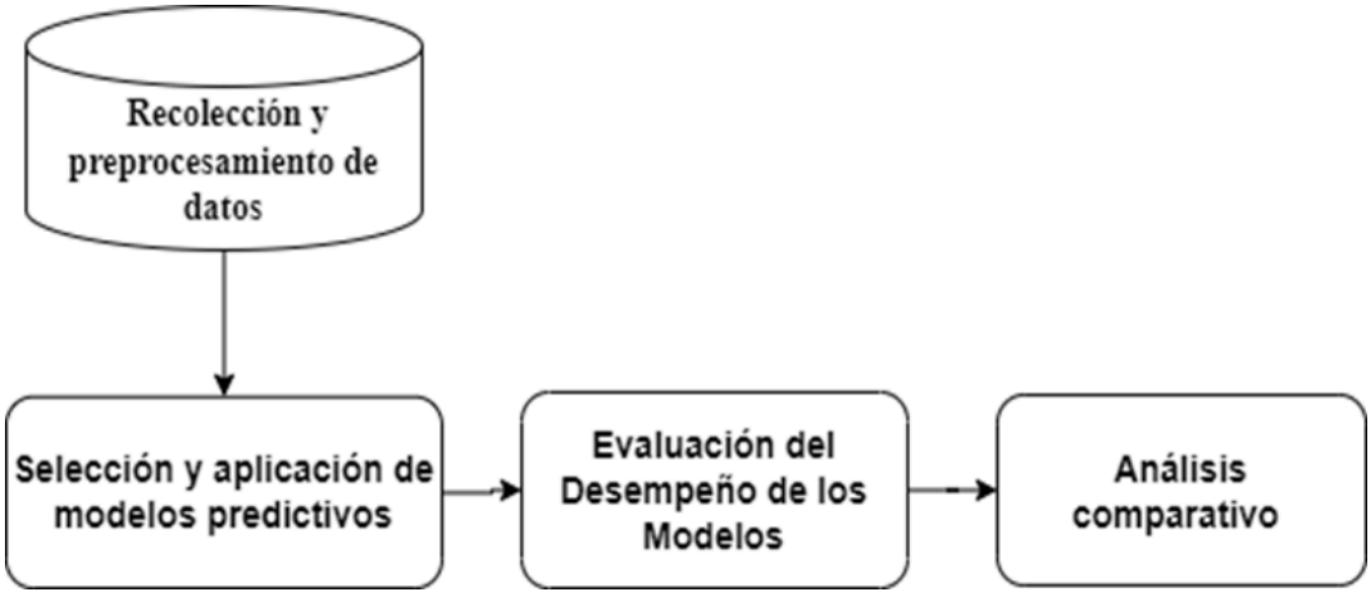


Figura 1: Metodología estudio comparativo de modelos predictivos de servicios de radio taxi

3.1. Datos

Se recopilaron datos históricos de la demanda de viajes del servicio de Radio Taxi de la Cooperativa Rápido Nacional, abarcando el período del 2 de enero de 2022 al 2 de enero de 2023. Los datos se almacenaron en una hoja de cálculo en formato Excel, que contenía un total de 68 278 registros distribuidos en siete columnas. Las variables incluidas en la base de datos fueron: fecha, hora, dirección de origen, unidad vehicular, dirección de destino, tiempo de respuesta y operador de radio.

Este conjunto de datos, que cubre la actividad de cuatro operadores de radio y 68 unidades vehiculares, proporcionó una base amplia para el análisis de la demanda de servicios de transporte en diferentes áreas geográficas de la ciudad. A partir de los totales diarios de servicios, se construyó una serie temporal con 366 registros, correspondiente a cada día del año.

Para evaluar y validar la capacidad predictiva de los modelos utilizados, la serie temporal se dividió en dos conjuntos: un conjunto de entrenamiento que abarcó el 80 % de los datos (292 días) y un conjunto de prueba que comprendió el 20 % restante (74 días). Esta división estratégica es fundamental para la validación del modelo, permitiendo evaluar su desempeño predictivo sobre datos no vistos durante el entrenamiento. La Figura 2 ilustra esta serie temporal, destacando en azul los datos de entrenamiento y en rojo los datos de prueba.

La base de datos original fue sometida a un riguroso proceso de limpieza debido a la presencia de valores faltantes y errores ortográficos en las variables de direcciones de origen y destino. Este proceso integral incluyó una etapa crucial de caracterización para mejorar la integridad y la calidad de los datos. En esta fase, se realizó un análisis de la ubicación geográfica, que consistió en dividir la ciudad en tres zonas principales: sur, centro y norte, utilizando como referencia el plano de Unidades Territoriales Urbanas (UTU).

Esta estrategia de caracterización fue fundamental, puesto que las ubicaciones individuales presentaban incoherencias y carecían de una representatividad completa. Al asociar cada ubicación con una de las zonas definidas, se logró una segmentación significativa y cohesiva de los datos, lo que permitió una comprensión más precisa de los patrones de solicitud de servicios en diferentes áreas geográficas de la ciudad.

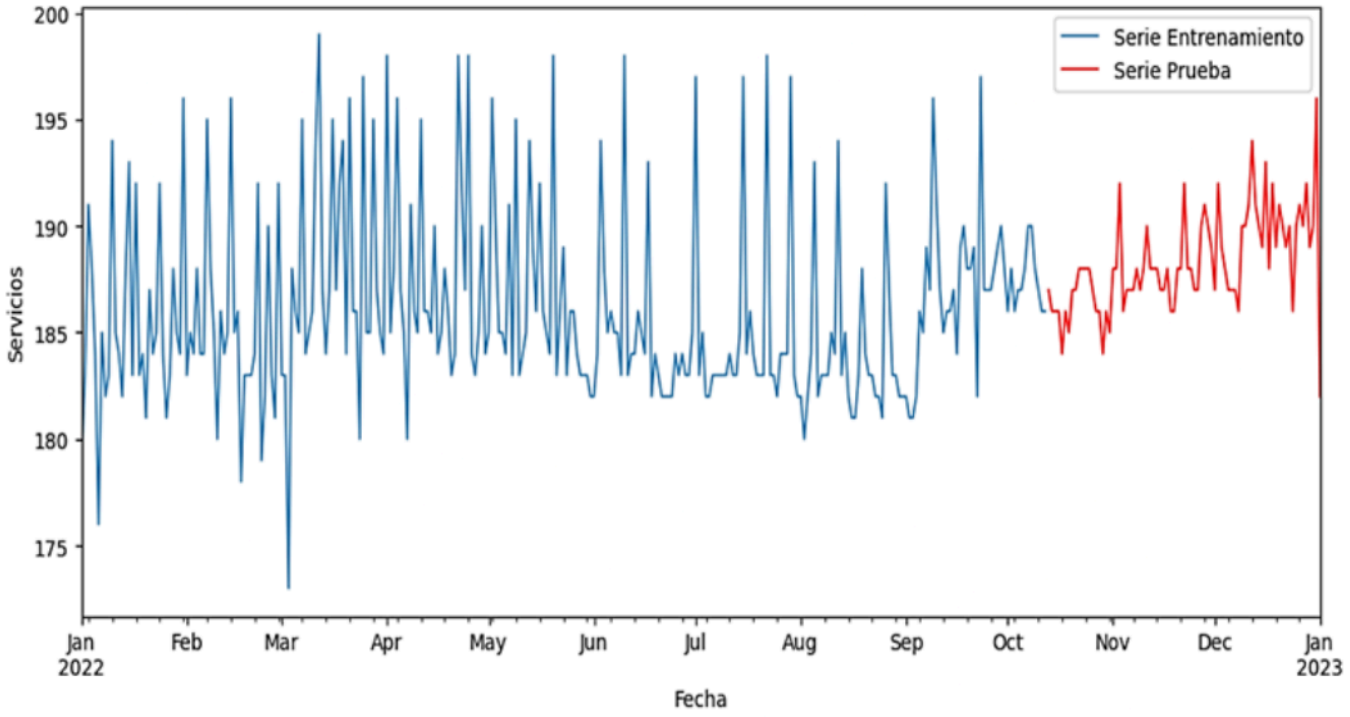


Figura 2: Serie temporal de servicios de radio taxi

3.2. Modelos predictivos

Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)

Los modelos ARIMA son herramientas ampliamente reconocidas en el estudio de series temporales, utilizadas para modelar y prever patrones en datos temporales, como la demanda de taxis. El modelo ARIMA combina elementos de autorregresión (AR), integración (I) y promedio móvil (MA) para capturar la autocorrelación, estacionalidad y tendencias en los datos [16]. Se representa como ARIMA(p, d, q), donde p representa la cantidad de términos autorregresivos, d indica el número de diferenciaciones no estacionales y q corresponde al número de errores de pronóstico rezagados. La elección precisa de estos parámetros proporciona una estructura adaptable y eficaz para analizar y predecir datos temporales, eliminando tendencias y capturando las complejidades de la serie temporal [11].

Prophet

El modelo *Prophet*, desarrollado por Facebook, representa una innovación en el campo de estudio de series temporales, demostrando su eficacia en la predicción de datos temporales caracterizados por patrones estacionales y tendencias anuales. Su capacidad para gestionar de manera efectiva eventos especiales, feriados y adaptarse a cambios en el comportamiento del usuario lo convierte en una opción altamente atractiva para el pronóstico de la demanda del servicio de taxi, especialmente en entornos urbanos dinámicos.

Este modelo se distingue por su capacidad intrínseca para manejar la complejidad inherente a los datos temporales, incorporando de manera automática eventos relevantes y adaptándose dinámicamente a las variaciones en el comportamiento temporal [17]. En el contexto específico de la predicción de la demanda de taxis, Prophet ofrece una solución robusta para la identificación de patrones estacionales y tendencias anuales, abordando de manera proactiva la inclusión de factores externos que podrían influir significativamente en la demanda, como feriados y otros eventos [18].

Prophet es descrito por la Ecuación 1, la cual representa el crecimiento en series temporales de una manera adaptable a diferentes patrones de cambio. Se estructura como una función a tramos, lo que significa que puede seguir un patrón de crecimiento lineal o logístico, capturando así cambios no periódicos [19].

$$y(t) = g(t) + s(t) + h(t) + \varepsilon_t \tag{1}$$

Por otro lado, $s(t)$ describe cambios repetitivos que siguen un patrón periódico, como la estacionalidad que puede ocurrir semanal o anualmente. Además, $h(t)$ representa los efectos de las vacaciones u otros eventos especiales que

pueden tener horarios irregulares. Finalmente, el término ε_t se refiere al error en el modelo, capturando cualquier cambio o variación inusual que no sea explicado por las funciones anteriores [19]. La capacidad de adaptación y la consideración precisa de múltiples variables hacen de Prophet una herramienta robusta para la planificación y optimización en entornos urbanos dinámicos, donde la demanda de taxis puede estar sujeta a fluctuaciones rápidas y cambios en el comportamiento del usuario.

Random Forest

Random Forest es un modelo de *machine learning* basado en ensamblaje que sobresale por su capacidad para operar conjuntos de datos complejos y capturar patrones no lineales. En lugar de depender de un solo modelo predictivo, utiliza múltiples árboles de decisión entrenados de manera independiente en subconjuntos aleatorios del conjunto de datos. La predicción final se determina mediante la combinación de las salidas de estos árboles, lo que aprovecha la diversidad de enfoques [20].

Este algoritmo es particularmente eficaz en el pronóstico de la demanda en contextos como los servicios de taxi, donde los factores pueden ser diversos y presentar relaciones no lineales. Además, Random Forest ofrece robustez al tratar con sobreajustes y es resistente al ruido en los datos, asegurando una generalización sólida a nuevos conjuntos de datos. Su naturaleza de ensamblaje proporciona estabilidad, mitigando sesgos individuales y mejorando la precisión general [21].

3.3. Métricas de evaluación

Métricas de evaluación

En este estudio comparativo de modelos, se utilizan métricas clave como el Error Cuadrático Medio (RMSE), el Error Absoluto Medio (MAE) y el Error Cuadrático Medio (MSE), las cuales son fundamentales para evaluar la precisión de los modelos analizados. Estas métricas desempeñan un papel crucial al proporcionar una evaluación cuantitativa y comparativa de la capacidad predictiva de cada modelo.

En las fórmulas que se presentarán a continuación, la notación se refiere a la serie real, mientras que la notación representa la serie pronosticada. Estas expresiones matemáticas ofrecen una base objetiva para la evaluación de la discrepancia entre los pronósticos generadas por los modelos y los datos reales de la serie temporal, contribuyendo así a un análisis riguroso de su desempeño comparativo [12].

Error Absoluto Medio (MAE)

El Error Absoluto Medio es el promedio de la diferencia absoluta entre los valores observados y predichos. Es una métrica lineal, lo que significa que todos los errores se ponderan por igual. Además, tiende a ser menos sensible a valores atípicos en comparación con el error cuadrático medio. Sus gradientes con respecto a las predicciones pueden tomar valores de $+1$ o -1 [22].

$$MAE = \frac{1}{n}\sum |y_j - \hat{y}_j| \tag{2}$$

Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)

Determina la diferencia entre el valor predicho por el modelo y el valor real.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(y_j - \hat{y}_j)^2} \tag{3}$$

Error Cuadrático Medio (MSE)

Calcula el error cuadrático medio, entre la predicción y el valor real

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(y_j - \hat{y}_j)^2 \tag{4}$$

3.4. Selección de modelos predictivos

Se seleccionaron los modelos ARIMA, Prophet y Random Forest debido a sus características complementarias. ARIMA es un modelo clásico para series temporales y es adecuado para capturar patrones estacionales y tendencias. Prophet, por su parte, es una herramienta robusta para modelar series temporales con cambios estructurales y estacionalidad compleja. Finalmente, Random Forest, como algoritmo de aprendizaje automático, puede capturar patrones no lineales y es útil para manejar series temporales con múltiples factores influyentes. Los parámetros de los modelos ARIMA se seleccionaron utilizando el criterio de información de Akaike (AIC). Para Prophet y Random Forest, se

realizó una búsqueda aleatoria de hiperparámetros con el objetivo de encontrar la combinación que minimizara el error de predicción en un conjunto de validación.

4. Resultados

Para determinar el comportamiento de la demanda en cada una de las zonas se calcula el número de servicios en origen y destino. Donde se puede evidenciar que la mayor dinámica del transporte de pasajeros en taxis se encuentra concentrada en el centro de la ciudad de Tulcán. Lo que concuerda con el progreso urbanístico de la ciudad, en la parte central se ubican instituciones financieras, servicios públicos e instituciones educativas, entre otros.

La Tabla 1 presenta la distribución de la demanda origen-destino en función de las zonas urbanas.

Tabla 1: Demanda Origen–Destino en función de zonas urbanas

Zona	**Origen**	**Destino**
Centro	39240	40154
Norte	12253	16743
Sur	16785	11381
Total de servicios	68278	68278

4.1. Evaluación del desempeño de los modelos

4.1.1. Resultados modelo ARIMA

Se realizó un análisis estadístico de la serie temporal para evaluar sus componentes, tales como la tendencia y la estacionalidad. Los resultados del análisis indicaron que la serie temporal es no estacionaria, lo que significa que la media y la varianza de la serie cambian con el tiempo. Para corregir la no estacionariedad, se empleó un modelo ARIMA (2,0,2) con diferenciación regular y estacional.

El modelo ARIMA (2,0,2) con diferenciación regular y estacional es un modelo que tiene en cuenta la tendencia y la estacionalidad de la serie temporal. El número de términos autorregresivos (p) es 2, lo que indica que el modelo utiliza dos variables pasadas para predecir el valor actual de la serie. El número de términos de media móvil (q) es 2, lo que indica que el modelo utiliza dos variables de error pasadas para predecir el valor actual de la serie. El orden de diferenciación no estacional (d) es 0.

El número de veces que la serie temporal se diferencia estacionalmente (D) es 1, lo que indica que la serie temporal tiene un período estacional de 12. Lo que da como resultado un modelo SARIMA (ARIMA estacional)

Los parámetros del modelo fueron seleccionados mediante máxima verosimilitud, señalando una tendencia constante y un patrón estacional aditivo. El rendimiento se evaluó utilizando métricas como el Error Cuadrático Medio (MSE), que resultó relativamente bajo, demostrando la capacidad del modelo para predecir con precisión los valores de la serie temporal.

El análisis de los errores revela un Error Absoluto Medio (MAE) de 1.46, un MSE de 4.71 y RMSE de 2.17. Estos resultados indican que el modelo ha capturado eficazmente la estructura subyacente de la serie temporal, respaldado por un criterio de información de Akaike (AIC) de 332.89 (Figura 3), lo que sugiere estabilidad en el modelo.

```
Series: d_test
ARIMA(2,0,2)(2,1,0)[12]

Coefficients:
ar1      ar2      ma1      ma2     sar1     sar2
0.0323   0.0955   0.1205   0.2761  −0.6120  −0.2442
s.e.   0.4234   0.3950   0.3997   0.3849   0.1512   0.1551

sigma^2 = 6.061:  log likelihood = −159.45
AIC = 332.89    AICc = 334.73    BIC = 348.53

[1] "MAE: 1.45936531913804"
[1] "MSE: 4.71446215429224"
[1] "RMSE: 2.17128122413755"
```

Figura 3: Resultados del modelo ARIMA

En la Figura 4 pronóstico modelo ARIMA, se aprecia un solapamiento inicial entre las series real y proyectada en los primeros días, lo que sugiere que el modelo ha logrado capturar de manera efectiva la tendencia original de la serie temporal. Este solapamiento inicial indica que las predicciones del modelo están en línea con las observaciones reales en el período inicial de la serie. En resumen, el modelo ha destacado su capacidad para anticipar la tendencia general y la estacionalidad de la serie temporal.

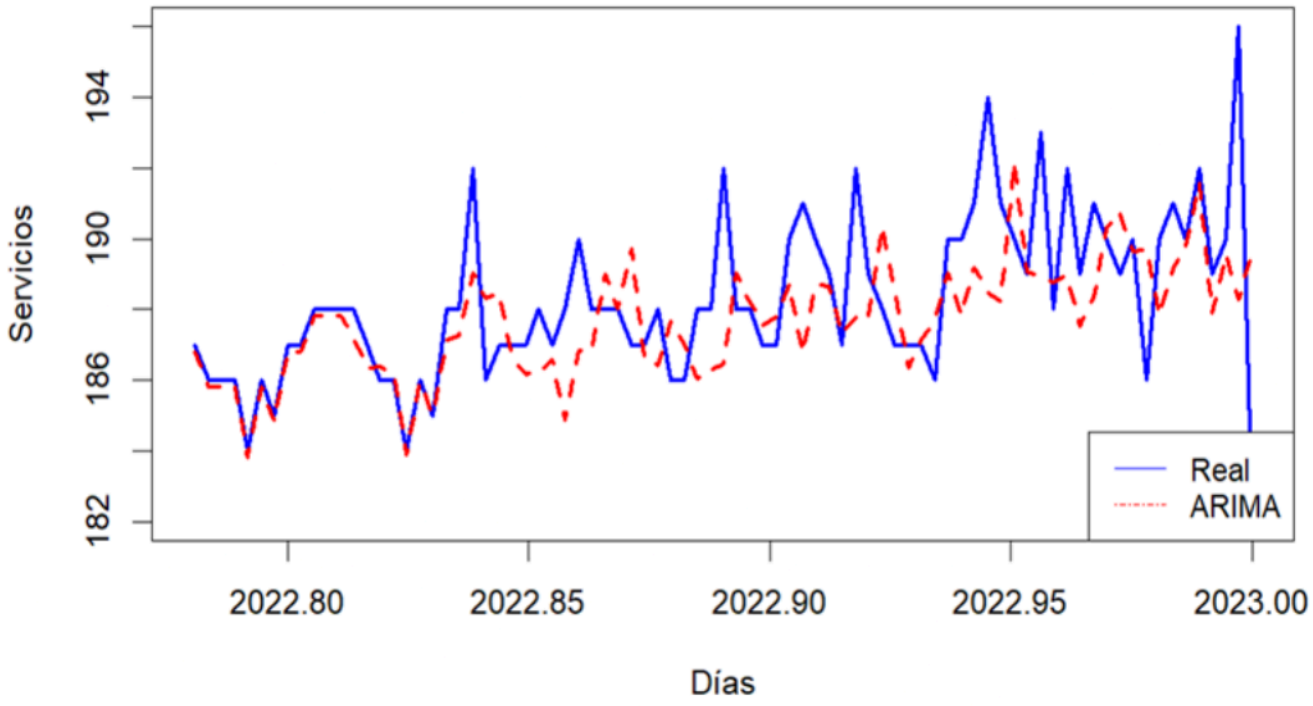


Figura 4: Pronóstico modelo ARIMA y datos de prueba

4.1.2. Resultados modelo Prophet

Se realizó una búsqueda aleatoria de hiperparámetros utilizando random search para identificar la combinación óptima que minimizara el error cuadrático medio sobre un conjunto de validación independiente. En este caso, la configuración empleada es la siguiente:

- Daily seasonality=TRUE: Esto permite al modelo capturar mejor las tendencias y variaciones a lo largo del día.
- Changepoint_prior_scale = 3: Este hiperparámetro controla la flexibilidad del modelo para adaptarse a cambios en la tendencia. Un valor de 3 indica una flexibilidad moderada, permitiendo al modelo ajustarse a cambios en la serie temporal.
- Seasonality_mode = adaptive: El modo de estacionalidad adaptativa es una elección inteligente, ya que permite al modelo ajustar automáticamente si la estacionalidad es aditiva o multiplicativa.
- Seasonality_prior_scale = 5: Este hiperparámetro ajusta la fuerza de la estacionalidad. Un valor de 5 indica que se está permitiendo cierta influencia de la estacionalidad en las predicciones, permitiendo una adaptación más sensible a las variaciones temporales.

La Figura 5 representa la predicción del modelo Prophet junto con los valores reales de la serie temporal. La predicción es capaz de capturar los valores picos de la serie en algunas ocasiones, lo que indica que el modelo es capaz de capturar las tendencias de la serie temporal. Además, la Figura 6 muestra que los días con mayor demanda son los lunes y viernes. Este resultado es coherente con las expectativas, puesto que son días laborables, lo que suele conllevar una mayor demanda de servicios.

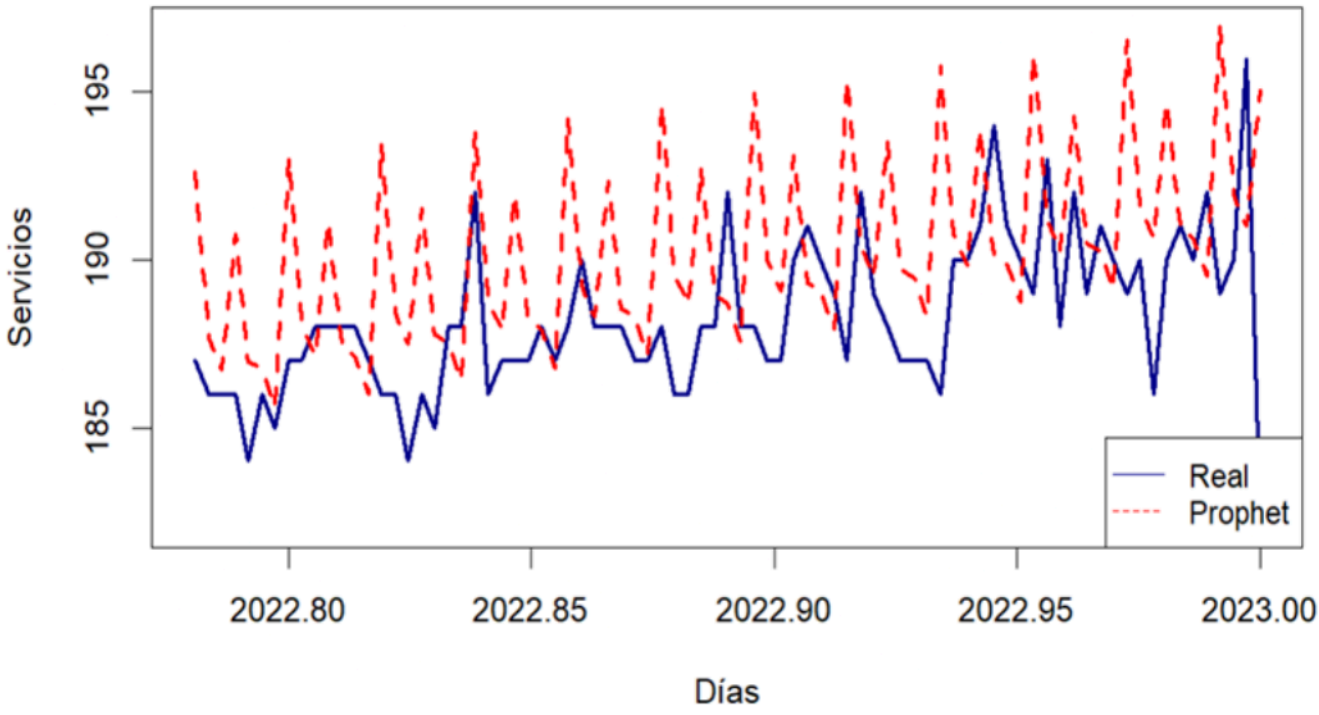


Figura 5: Pronóstico modelo Prophet y datos de prueba

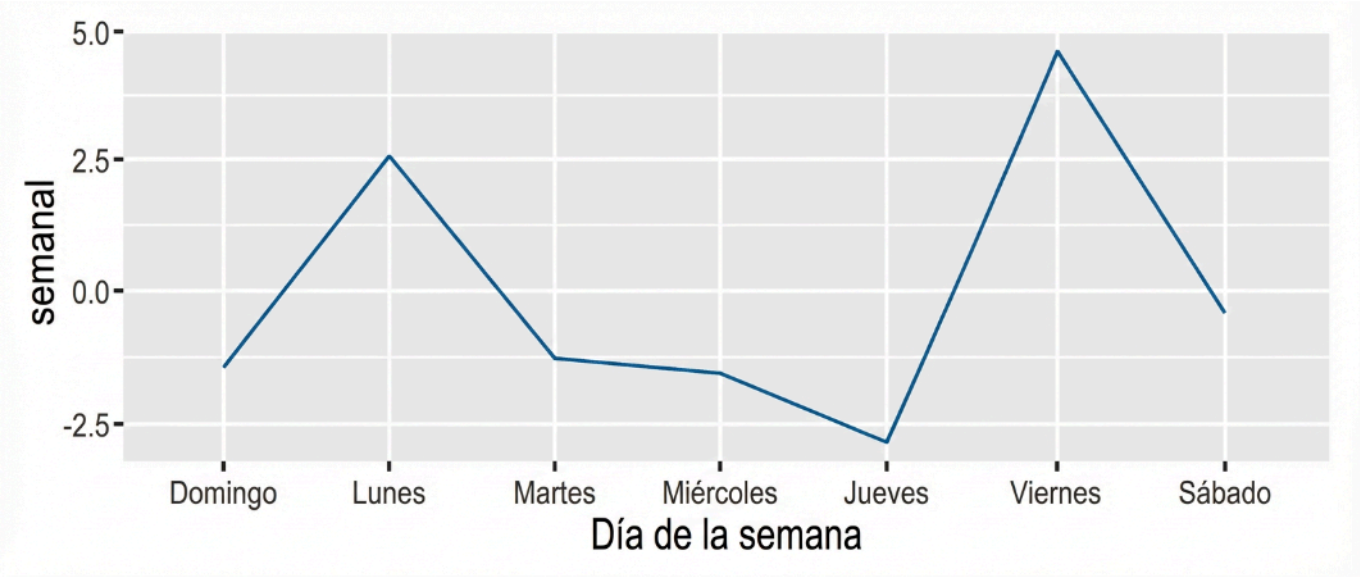


Figura 6: Comportamiento semanal modelo Prophet

Se evaluaron las métricas de predicción con el conjunto de prueba y el conjunto predicho, el valor MAE fue igual a 2.83, indica que, en promedio, las predicciones difieren alrededor de 2.83 unidades del valor real. Este valor es relativamente bajo, demostrando que el modelo tiene un buen rendimiento en términos de precisión.

Además, el MSE de 14.63 revela que existen variabilidades significativas en las predicciones, siendo más grandes los errores cuadráticos promedio. Por otra parte, el valor RMSE de 3.82, ofrece una perspectiva intuitiva de la dispersión de los errores. Un valor de 3.82 revela que los pronósticos difieren, en promedio, alrededor de 3.82 unidades de los valores reales. En general, los resultados de los errores son positivos. Prophet tiene un buen rendimiento en términos de precisión, aunque podría mejorar en términos de variabilidad.

4.1.3. Resultados modelo Random forest

Para optimizar el modelo de bosque aleatorio, se realizó una búsqueda exhaustiva de hiperparámetros utilizando grid search. Se variaron los siguientes parámetros: número de árboles entre 50 y 200, profundidad máxima entre 3 y 10, criterio de división (Gini o entropía), y número de variables aleatorias consideradas en cada división. Se evaluó el desempeño de cada combinación de hiperparámetros utilizando el error cuadrático medio en un conjunto de validación independiente. La configuración óptima seleccionada fue: 100 árboles, profundidad máxima de 5, criterio de división Gini y un tercio de las variables consideradas en cada división. Esta configuración permitió obtener un modelo con un buen equilibrio entre sesgo y varianza.

En el análisis del modelo Random Forest, se utilizaron diferentes métricas para evaluar su desempeño. Los resultados obtenidos fueron los siguientes: el Error Absoluto Medio (MAE) fue de 3.28, el Error Cuadrático Medio (MSE) fue de 17.02, y RMSE fue de 4.13.

En cuanto a los hiperparámetros del modelo, se configuraron con un número de árboles (ntree) igual a 100, una profundidad máxima (max_depth) de 10 y un tamaño mínimo de nodo hoja (min_node_size) de 8.

Para este modelo en la Figura 7, se visualiza que el algoritmo logra una precisión notable al pronosticar los valores al final de la serie temporal. Este aspecto muestra una capacidad significativa del modelo para anticipar los patrones en la última fase de la serie. Además, se observa que las predicciones siguen la tendencia general de la serie original, lo que sugiere que el modelo ha capturado adecuadamente la estructura subyacente de los datos. Sin embargo, se identifica una discrepancia en la amplitud en el eje vertical (servicios), indicando que, aunque los coeficientes de error son bajos, existen variaciones en la magnitud de las estimaciones.

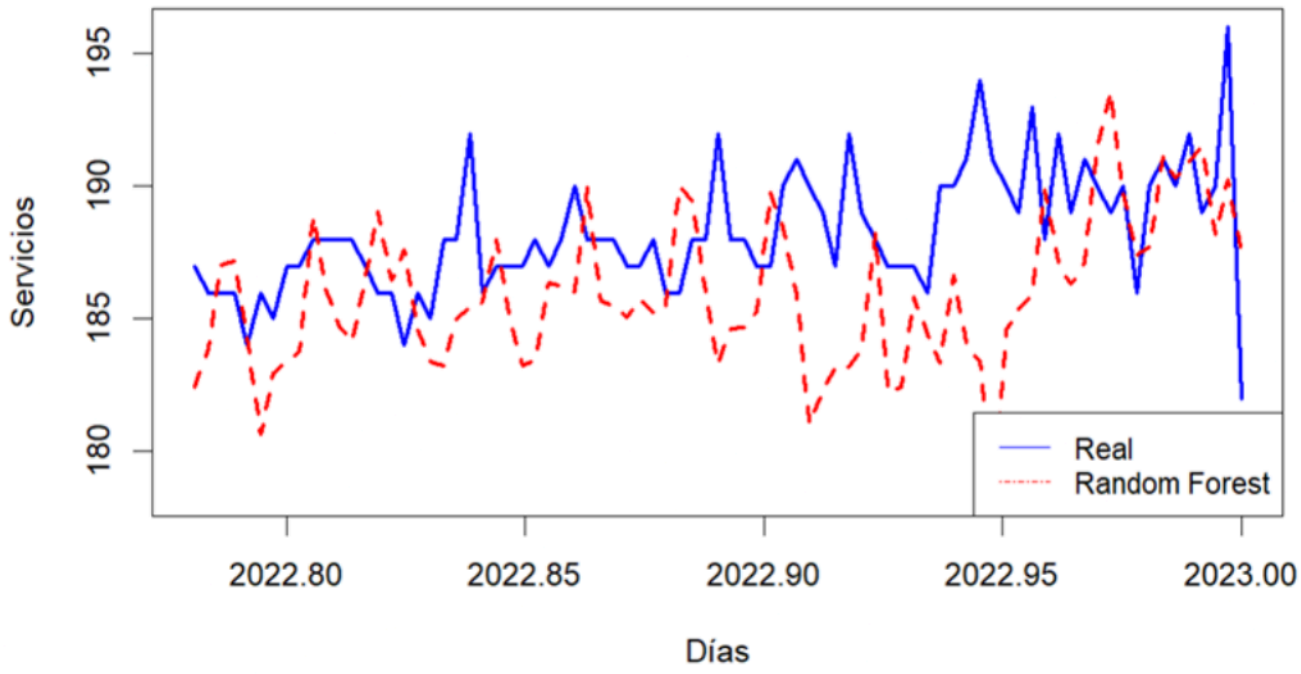


Figura 7: Pronóstico modelo Random Forest y datos de prueba

4.2. Análisis comparativo

El análisis comparativo de los modelos de pronóstico destaca a ARIMA como la opción óptima para prever la demanda de viajes en servicios de radio taxi, como se detalla en la Tabla 2 coeficientes de error de los modelos predictivos.

Tabla 2: Coeficientes de error de los modelos predictivos

Modelos	MAE	MSE	RMSE
ARIMA	1.46	4.71	2.17
Prophet	2.83	14.62	3.82
Random forest	3.27	17.03	4.12

Los coeficientes de error de los tres modelos. Demuestran que ARIMA exhibe el menor Error Medio Absoluto (MAE) de 1.46, indicando que, en promedio, las predicciones difieren apenas 1.46 unidades del valor real. Además, presenta un rendimiento notable en términos de variabilidad, lo que sugiere que las predicciones están cercanas a los valores reales.

Comparativamente, el modelo Prophet muestra un rendimiento ligeramente inferior en precisión, con un MAE de 2.83, pero destaca en estabilidad, evidenciado por un MSE de 14.63 y un RMSE de 3.82. En contraste, el modelo Random Forest presenta un rendimiento menos preciso, con un MAE de 3.28, aunque exhibe mayor estabilidad con un MSE de 17.02 y un RMSE de 4.13.

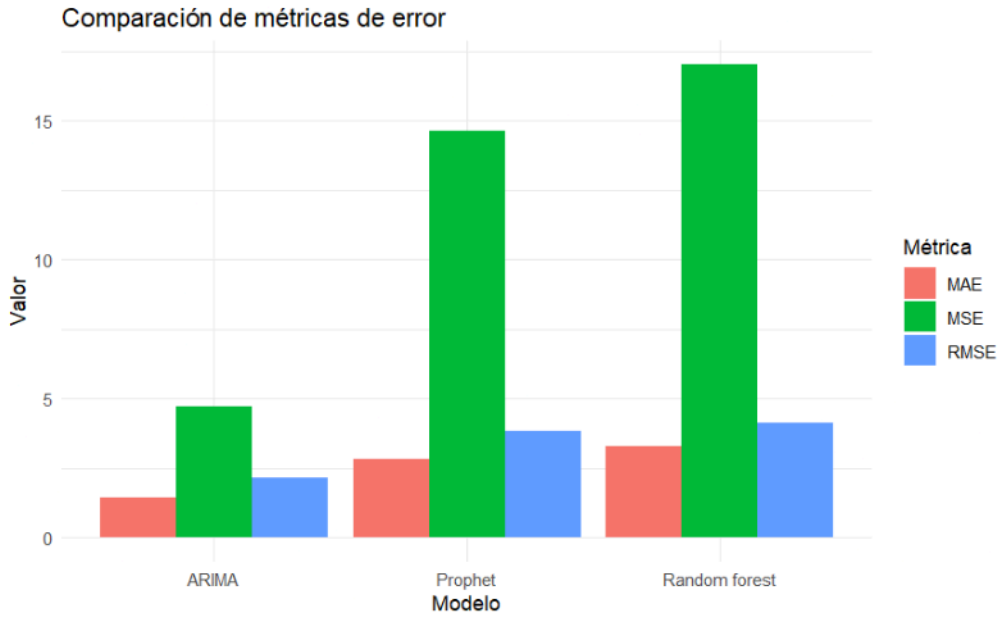


Figura 8: Comparación de métricas de error de los modelos predictivos

Los resultados generales respaldan la elección de ARIMA como la mejor alternativa para predecir la demanda de viajes en servicios de radio taxi, como se refleja en la Figura 9. La precisión y estabilidad de ARIMA lo convierten en una herramienta valiosa para la predicción de la demanda de servicios de radio taxi de la cooperativa Rápido Nacional, permitiendo una asignación eficiente de recursos, como vehículos y conductores, así como la identificación de oportunidades estratégicas, como la expansión a nuevas áreas o la introducción de servicios adicionales.

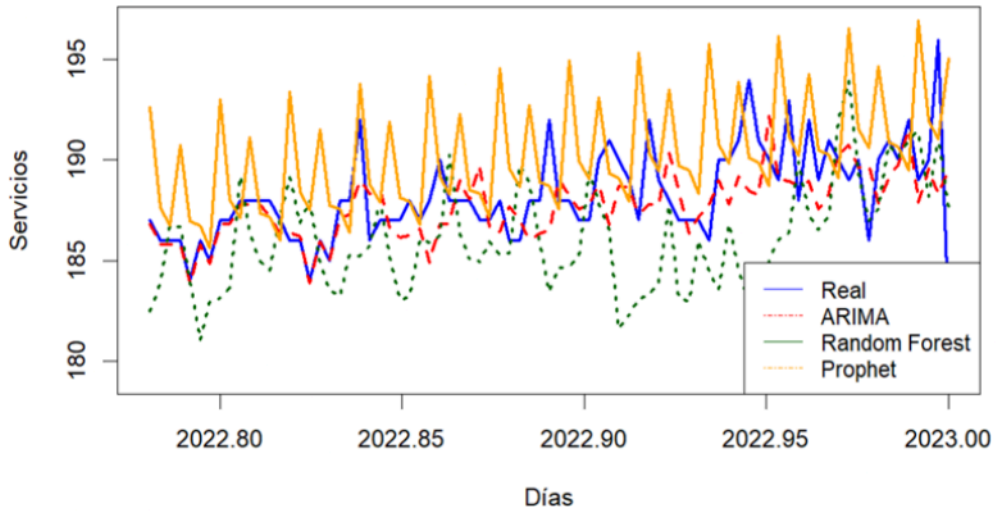


Figura 9: Servicios de radio taxi serie original y pronósticos

Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en este estudio son consistentes con investigaciones previas que han utilizado modelos ARIMA para predecir la demanda de transporte. Sin embargo, a diferencia de [23], donde se encontró que Random Forest superaba a ARIMA en series de tiempo con alta frecuencia, nuestros resultados muestran un mejor desempeño de ARIMA. Esta diferencia podría deberse a las características específicas de nuestros datos, como una menor variabilidad estacional y una tendencia más lineal. Además, la inclusión de variables explicativas adicionales en el modelo Random Forest podría mejorar su precisión, tal como se ha demostrado en [24]. Sin embargo, en nuestro caso, ARIMA resultó ser el modelo más adecuado para capturar los patrones subyacentes de la demanda de viajes en radio taxi.

El análisis comparativo de los modelos de pronóstico resalta a ARIMA como la opción óptima para prever la demanda de viajes en servicios de radio taxi, un hallazgo consistente con estudios previos que han identificado a ARIMA como una herramienta eficaz en la predicción de series temporales en contextos similares. Por ejemplo, investigaciones realizadas por [11] han demostrado la efectividad de los modelos ARIMA en situaciones donde los patrones de datos son estacionales y tienen componentes de tendencia bien definidos.

En comparación, el modelo Prophet, aunque menos preciso que ARIMA, ofrece una estabilidad destacable en sus predicciones. Este modelo es reconocido por su capacidad para manejar series temporales con fuertes efectos estacionales y días festivos, lo que lo hace adecuado para datos con variaciones significativas a lo largo del tiempo [25].

El rendimiento del modelo Random Forest, si bien es menos preciso en términos de MAE, MSE y RMSE, sigue siendo una alternativa viable para escenarios donde la facilidad de implementación y la capacidad de manejar datos de alta dimensionalidad son importantes. [26] resalta la robustez de este método para la predicción en contextos con múltiples variables predictoras.

Los resultados generales del estudio, ilustrados en las Figuras 8 y 9, refuerzan la elección de ARIMA como la mejor alternativa para la predicción de la demanda de servicios de radio taxi de la cooperativa Rápido Nacional. Su precisión y estabilidad lo convierten en una herramienta invaluable para optimizar la asignación de recursos, como vehículos y conductores, y para identificar oportunidades estratégicas, como la expansión a nuevas áreas geográficas o la introducción de servicios adicionales.

5. Conclusiones y trabajo futuro

En este artículo, se ha evaluado el desempeño de tres modelos predictivos (ARIMA, Prophet y Random Forest) en la predicción de la demanda de viajes en servicios de radio taxi. Los resultados del análisis indican que el modelo ARIMA se destaca como la mejor opción, mostrando el menor Error Medio Absoluto (MAE) y un buen rendimiento en términos de variabilidad, lo que sugiere que sus predicciones son precisas y estables en comparación con los otros modelos, como se observa en la Figura 9. Este modelo se presenta como una elección idónea para empresas de radio taxi

que buscan anticipar tanto tendencias como variaciones diarias en la demanda, permitiendo la planificación eficiente de la asignación de recursos y la identificación de oportunidades de crecimiento.

Por otro lado, los resultados sugieren que el modelo Prophet también es una opción viable para predecir la demanda de viajes en servicios de radio taxi. Aunque su precisión es ligeramente inferior a la de ARIMA, como lo demuestran los valores de MAE descritos en la Tabla 2, Prophet demuestra un mejor rendimiento en términos de variabilidad, ofreciendo predicciones más estables, aunque potencialmente menos precisas que las del modelo ARIMA.

El modelo Random Forest, por su parte, exhibe un rendimiento inferior tanto en términos de precisión como de variabilidad en comparación con ARIMA y Prophet. A pesar de ello, podría ser una opción adecuada para empresas que buscan un modelo de predicción rápido y fácil de implementar, aunque con predicciones potencialmente menos precisas y estables que los otros dos modelos evaluados.

La principal limitación de este estudio radica en su enfoque en una sola ciudad. Para trabajos futuros, se recomienda extender la investigación a múltiples localidades para evaluar la robustez de los modelos. Además, investigar técnicas más avanzadas de *machine learning*, como redes neuronales o modelos *ensemble*, para mejorar aún más la precisión y estabilidad de las predicciones. Por otra parte, sería beneficioso explorar el impacto de factores externos, como condiciones climáticas y eventos locales, en la demanda de viajes. Otro aspecto importante es el desarrollo de estrategias para la implementación en tiempo real de estos modelos predictivos, integrándolos en sistemas de gestión de flotas para optimizar la asignación de recursos de manera dinámica.

Referencias

[1] R. Arteaga-Sánchez, M. Belda-Ruiz, A. Ros-Galvez, and A. Rosa-Garcia, "Why continue sharing: Determinants of behavior in ridesharing services," *International Journal of Market Research*, vol. 62, no. 6, pp. 725–742, 2020.

[2] B. Roy and D. Rout, "Predicting taxi travel time using machine learning techniques considering weekend and holidays," in *Advances in Computing and Data Sciences*, 2022, pp. 258–267.

[3] G. S. Bauer, A. Phadke, J. B. Greenblatt, and D. Rajagopal, "Electrifying urban ridesourcing fleets at no added cost through efficient use of charging infrastructure," *Transportation Research Part C*, vol. 105, pp. 385–404, 2019.

[4] T. Lyu, P. Wang, Y. Gao, and Y. Wang, "Research on the big data of traditional taxi and online car-hailing: A systematic review," *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 1–34, 2021.

[5] V. Cuevas, M. Estrada, and J. M. Salanova, "Management of on-demand transport services in urban contexts. barcelona case study," *Transportation Research Procedia*, vol. 13, pp. 155–165, 2016.

[6] J. Aarhaug and K. Skollerud, "Taxi: Different solutions in different segments," *Transportation Research Procedia*, vol. 1, no. 1, pp. 276–283, 2014.

[7] R. Goyal, C. Reiche, C. Fernando, and A. Cohen, "Advanced air mobility: Demand analysis and market potential of the airport shuttle and air taxi markets," *Sustainability*, vol. 13, no. 13, p. 7421, 2021.

[8] A. Thakur and D. S. Monga, "Taxi demand forecasting utilizing neighbourhood influence based on ensemble learning," *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, vol. 10, no. 5, pp. 894–900, 2022.

[9] K. Zhao, D. Khryashchev, and H. Vo, "Predicting taxi and uber demand in cities: Approaching the limit of predictability," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 33, no. 6, pp. 2723–2736, 2021.

[10] M. Odeh, "Taxi trips prediction and bus capacity coverage analysis," 2020.

[11] M. S. Jamil and S. Akbar, "Taxi passenger hotspot prediction using automatic arima model," in *ICSITech*, 2017, pp. 23–28.

[12] Z. Liu, H. Chen, X. Sun, and H. Chen, "Data-driven real-time online taxi-hailing demand forecasting based on machine learning method," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 19, p. 6681, 2020.

[13] S. Rajendran, S. Srinivas, and T. Grimshaw, "Predicting demand for air taxi urban aviation services using machine learning algorithms," *Journal of Air Transport Management*, vol. 92, p. 102043, 2021.

[14] S.-H. Choi and M.-K. Han, "The empirical evaluation of models predicting bike sharing demand," in *ICTC*, 2020, pp. 1560–1562.

[15] B. R. Pérez-Gutiérrez, "Comparación de técnicas de minería de datos para identificar indicios de deserción estudiantil," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 19, no. 1, pp. 193–204, 2020.

[16] L. I. Pérez, P. C. Millán, V. I. L. de Sabando, and P. Casares, "Impacto de los shocks externos en el transporte aéreo," *Anales ASEPUMA*, vol. 28, p. 6, 2020.

[17] A. Maltas, H. Ozen, and A. Saracoglu, "Methodology to detect bus stop influence zones utilizing facebook prophet changepoint detection method," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 27, no. 10, pp. 4472–4484, 2023.

[18] S. Rashidibajgan and T. Hupperich, "Improving the performance of opportunistic networks using machine learning techniques," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 11, no. 4, p. 61, 2022.

[19] J. López, "Análisis de series de tiempo pronóstico de demanda de uso de aeropuertos en argentina," 2018.

[20] M. e. a. Aghaabbasi, "Predicting the use frequency of ride-sourcing by off-campus university students," *Transportation Research Part A*, vol. 136, pp. 262–281, 2020.

[21] S. e. a. Salcedo-Sanz, "Analysis, characterization, prediction, and attribution of extreme atmospheric events," *Theoretical and Applied Climatology*, 2023.

[22] X. Li, H. Wang, P. Sun, and H. Zu, "Spatiotemporal features—extracted travel time prediction leveraging gcn," *Sustainability*, vol. 13, no. 3, p. 1253, 2021.

[23] J. e. a. Liu, "Short-term forecasting of emerging on-demand ride services," in *ICTIS*, 2017, pp. 489–495.

[24] M. M. Ibrahim and F. S. Mubarek, "Improving prediction for taxi demand by using machine learning," in *DeSE*, 2023, pp. 451–456.

[25] S. J. Taylor and B. Letham, "Business time series forecasting at scale," *PeerJ Preprints*, 2017.

[26] X. Yan, X. Liu, and X. Zhao, "Using machine learning for direct demand modeling of ridesourcing services in chicago," *Journal of Transport Geography*, vol. 83, p. 102661, 2020.

IDEAS

Innovation & Development in Engineering and Applied Science

Journal homepage: https://revistasojs.utn.edu.ec/index.php/ideas

El control autómata para optimización de procesos productivos del banano en Ecuador: Una revisión sistemática

Automated Control for the Optimization of Banana Production Processes in Ecuador: A Systematic Review

Edison Noe Buenaño Buenaño[a], Ronald Fabricio Jiménez Salinas[a], Kleiner Manuel Del Pezo Chal én[a], Monica Isabel Paredes Castro[a]

[1] Universidad Estatal Península de Santa Elena, Av. La Libertad, Santa Elena, Ecuador

Enviado: 2024-10-13, Aceptado: 2025-05-29, Publicado: 2026-01-30
Autor de correspondencia:
Edison Buenaño: ebuenano@upse.edu.ec
DOI: 10.53358/ideas.v8i1.1161

PALABRAS CLAVE

Control automático,
PLC,
sostenibilidad industrial,
SCADA,
producción de banana,
automatización industrial,
optimización de procesos.

RESUMEN

La producción bananera en Ecuador enfrenta desafíos en eficiencia operativa y sostenibilidad, con limitada adopción de tecnologías de control automático que optimicen procesos y reduzcan impactos ambientales. El objetivo es identificar herramientas tecnológicas con enfoque circular para implementar sistemas de control automático que mejoren la productividad, estabilidad y sostenibilidad en la cadena productiva del banano. La revisión de la literatura permitió identificar y seleccionar investigaciones de fuentes confiables, proporcionando una base sólida para el desarrollo investigativo, con diversas herramientas con enfoques circulares que fueron identificadas como fundamentales para la investigación sobre control automático en la producción de banano en Ecuador. La metodología utilizada es una revisión de alcance; este proceso se dividió en tres fases: planificación, ejecución y difusión. Se utilizaron plataformas centradas en el análisis de variables estadísticas, lo que permitió optimizar el rendimiento de los sistemas mediante la recopilación y análisis de datos. Esto mejoró la eficiencia, estabilidad y respuesta del control automático. Además, el uso de sistemas PLC y SCADA se destacó como una metodología efectiva para diseñar prototipos de control automatizado que beneficien a las empresas. Los sistemas PLC y SCADA demostraron ser eficaces para diseñar prototipos de control automatizado, mejorando un 20-30 % la eficiencia y respuesta operativa. La revisión también resalta el impacto positivo de los controladores lógicos programables (PLC) en la industria latinoamericana, mejorando la sostenibilidad y competitividad en mercados globales.

KEYWORDS

Automatic control,
PLC,
industrial sustainability,
SCADA,
banana production,
industrial automation,
process optimization.

ABSTRACT

Banana production in Ecuador faces challenges in operational efficiency and sustainability, with limited adoption of automatic control technologies that optimize processes and reduce environmental impacts. The objective is to identify technological tools with a circular approach to implement automatic control systems that improve productivity, stability, and sustainability in the banana production chain. The literature review allowed for the identification and selection of research from reliable sources, providing a solid foundation for the development of the study. Various tools with circular approaches were identified as fundamental to the research on automatic control in banana production in Ecuador. The methodology used is a scoping review, divided into three phases: planning, execution, and dissemination. Platforms focused on statistical variable analysis were used, allowing for the optimization of system performance through data collection and analysis. This improved the efficiency, stability, and responsiveness of automatic control systems. Additionally, the use of PLC and SCADA systems was highlighted as an effective methodology for designing automated control prototypes that benefit companies. PLC and SCADA systems proved to be effective in designing automated control prototypes, improving efficiency and operational response by 20–30 %. The review also highlights the positive impact of programmable logic controllers (PLCs) in the Latin American industry, enhancing sustainability and competitiveness in global markets.

1. Introducción

Involucrar tecnologías modernas es un paradigma en la era actual, desde un punto de vista social y de optimización de procesos, de esta forma el control autómata ha sustituido los sistemas de gestión tradicionales, marcando un hito en la automatización industrial. Su diseño modular y flexible permite adaptarse de manera eficiente a las demandas cambiantes de producción y a los sistemas autónomos, lo que facilita su implementación en diversas industrias. Como resultado, el 75 % de las empresas manufactureras que adoptaron este enfoque han reportado un incremento del 30 % en la eficiencia operativa [1]. Además, el mercado global de estos sistemas alcanzó los 12,5 mil millones de dólares en 2020, con un crecimiento anual del 5,6 % desde 2017 [2], lo que demuestra su capacidad para optimizar procesos y potenciar la competitividad en el entorno industrial.

En América Latina, los sistemas de control autómatas son ampliamente utilizados como sistemas industriales robustos y confiables. Gracias a su capacidad para soportar condiciones ambientales inestables y adaptarse a diversas aplicaciones automatizadas, los Controladores Lógicos Programables (PLC), como el LOGO PLC de SIEMENS, han mejorado notablemente la eficiencia y precisión en los sistemas de control autónomo [3]. Esto ha permitido que el 60 % de las fábricas latinoamericanas adopten estos sistemas, empleando sensores adaptados a diferentes entornos para optimizar y garantizar operaciones más confiables y eficientes [4].

En Ecuador, los sistemas de control industrial (ICS) utilizan PLC para automatizar procesos físicos claves. Estos sistemas se implementan en infraestructuras críticas como plantas hidroeléctricas y estaciones de redes eléctricas, facilitando la automatización y control eficiente de dichos procesos. Sin embargo, al ser componentes vitales de la infraestructura nacional, estos sistemas son frecuentemente blanco de ataques cibernéticos, lo que subraya la necesidad de mejorar su ciberseguridad [5].

Un sistema de control autómata emplea módulos de entrada y salida para ejecutar un diagrama de escalera (LD), integrando bloques de funciones PID que controlan los parámetros del proceso. Las señales analógicas de estos parámetros se convierten en digitales y se envían al controlador PID para su procesamiento eficiente [6, 7]. No obstante, al aumentar la cantidad de parámetros controlados, el tiempo de exploración del PLC se ralentiza, lo que puede comprometer su capacidad para gestionar el proceso de manera óptima [8]. Este trabajo propone un controlador PID múltiple basado en una matriz de puertas programables en campo (FPGA) para mantener el tiempo de exploración del PLC bajo. La ejecución simultánea de múltiples controladores PID se logra asignando recursos de hardware FPGA separados para cada entrada digital, utilizando una novedosa conversión de analógico a digital [9].

La importancia se da por la lentitud en el transporte manual de los productos verdes impacta negativamente en el rendimiento general de la finca, ya que la ausencia de un sistema automatizado para el cable aumenta los cuellos de botella en la producción. Esto genera tiempos muertos, reduce la competitividad en el mercado y presenta

riesgos adicionales, como lesiones para los trabajadores y limitaciones en carga y velocidad, encontrando un vacío del conocimiento aun no explorado en el mejoramiento productivo de fincas de producción de banano.

2. Materiales y Métodos

En la revisión sistemática se aplica una revisión de alcance que identifica las definiciones claves de una investigación a través de una cobertura minuciosa de la literatura [10]. Esta revisión consiste en una serie de pasos estructurados diseñados para mapear la literatura existente sobre un tema específico [11].

El método que se utiliza es Analytic Hierarchy Process (AHP). Menciona también [12], que este enunciado de Saaty se enmarca en evaluar las restricciones de las variables, ponderándolas en una escala del 1 al 9 y del 2 al 8, según las escalas de Saaty. De esta forma, se busca relacionar los temas de interés de estudio con una metodología efectiva.

En la Figura 1, se ilustra el proceso para llevar a cabo la revisión de alcance de la literatura según [13]. Este proceso se divide en tres fases: planificación, ejecución y difusión. La primera etapa consiste en identificar la pregunta central y definir el alcance de la investigación. La segunda etapa se enfoca en establecer los criterios y seleccionar los artículos de fuentes primarias. Y como última fase se realiza un análisis detallado de los estudios identificados.

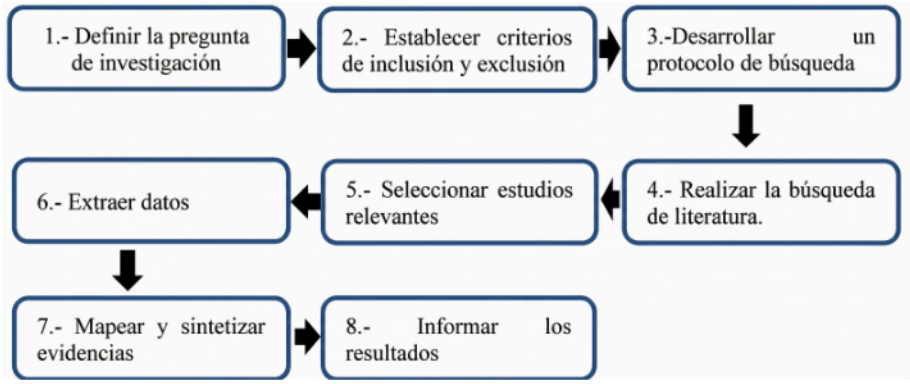


Figura 1: *Etapas a desarrollar en la revisión de alcance*

2.1. Pregunta de investigación

¿Qué prácticas se destacan en la literatura científica sobre el diseño de equipos de control autómata para la optimización de procesos productivos en el sector agroindustrial?

2.2. Alcance de la revisión

Existen numerosas bases de datos con información diversa; no obstante, este estudio se enfoca específicamente en contenidos relacionados con la ingeniería, automatización, optimización de procesos y control autómata. El periodo de búsqueda abarca desde el año 2019 hasta agosto de 2024.

Los principales motores de búsqueda fueron: Scopus, Scielo, Research article, Asecam, Cepal, Sciencedirect, Dialnet, Redalyc y contenido basado en (Control Automata OR automatización industrial) AND (Diseño de prototipo automaticos OR optimización de procesos), o en inglés (Control Automata OR industrial automation) AND (Design of automatic prototypes OR process optimization).

Criterios de Exclusión Aplicados en la Revisión:

Por la relevancia temática: se excluyeron artículos que no abordaban directamente control automático, sistemas PLC/SCADA, o aplicaciones de automatización en agricultura (específicamente en producción bananera). Estudios centrados en otros cultivos o industrias no relacionadas.

Calidad metodológica: Investigaciones sin revisión por pares (ej. preprints, informes técnicos no arbitrados). Artículos con muestras insuficientes, metodologías no replicables o sin análisis estadístico válido.

Disponibilidad de datos: Publicaciones sin acceso completo al texto o con información insuficiente para extraer resultados aplicables.

Razón para la eliminación de los 63 artículos: Los 63 documentos descartados durante el proceso de selección no cumplieron con uno o más de los siguientes filtros (detallados en el diagrama PRISMA aplicado): 45 artículos fueron eliminados porque sus títulos/abstracts indicaban claramente que no abordaban automatización, eficiencia energética, o producción sostenible en el sector bananero. Evaluación de texto completo: 18 artículos restantes se descartaron tras una lectura detallada.

En la Figura 2, se detalla el proceso de selección de artículos para la RA de la literatura. Durante la fase de identificación, se estudiaron 30 artículos en Redalyc, 512 en ScienceDirect, 105 en Scopus, 16 en Dialnet, 13 en UPCommons, 4 en MDPI y 16 en web of sciencie, totalizando 696 artículos. Se detectaron 109 duplicados, resultando en 587 artículos únicos para examinar. Aplicando los criterios de exclusión, se descartaron 496 fuentes adicionales. En la evaluación final, se eliminaron 63 artículos más, quedando 28 artículos con contenido adecuado para el estudio. Estos 28 artículos mencionados, sirven de base para desarrollar una metodología viable, sencilla y replicable.

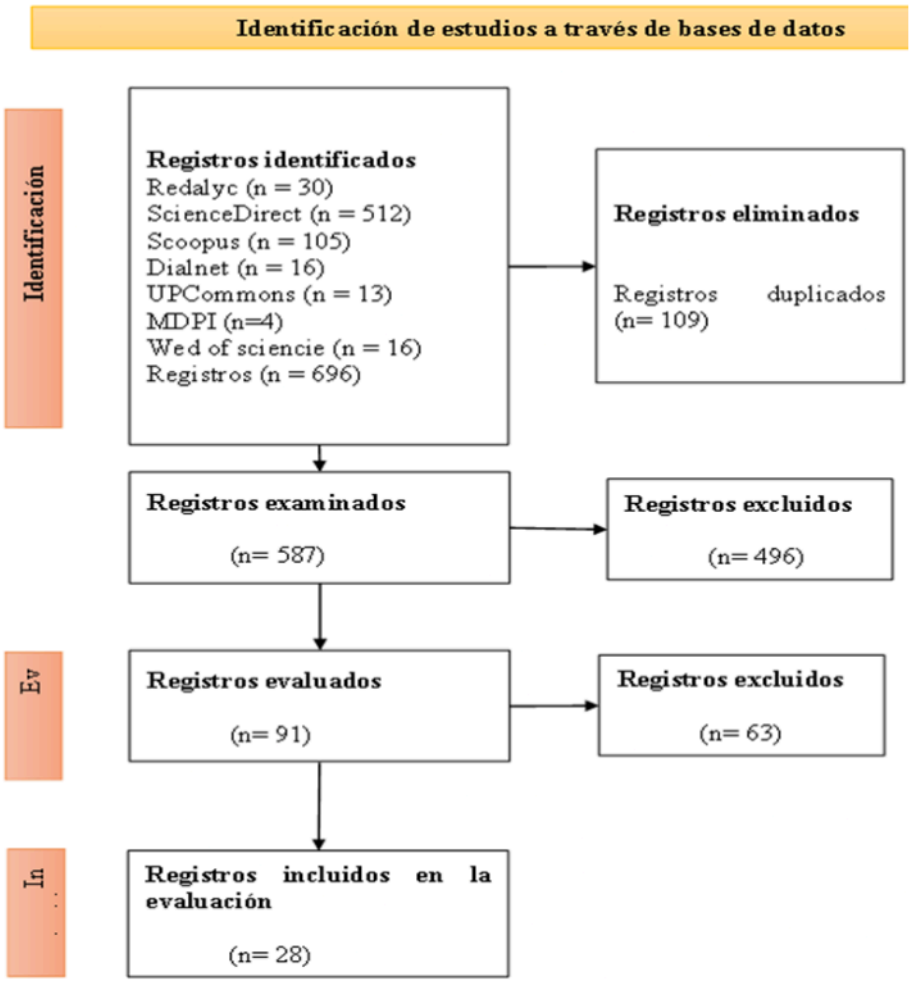


Figura 2: *Estudios relacionados a la pregunta de investigación*

3. Resultados

En primera instancia fue necesario elaborar una matriz referencial en la Tabla 1, con la información recopilada. Esto proporcionará una base sólida para continuar con el proceso investigativo. La matriz destaca el contenido relevante de cada autor, el título del artículo de investigación, y lo relevante de esta y la herramienta utilizada.

Tabla 1: *Matriz referencial de artículos*

N.	Autor	Titulo	Herramienta	Fuente
A1	[14]	Evaluation of an automated temperature control equipment for lactating sows	Análisis de variables estadísticas	Redalyc
A2	[15]	Sistema se laboratorios remotos para las prácticas de control de la carrera de ingeniería en automática,	Metodología computacional	Redalyc
A3	[16]	Diseño e implementación de un sistema automático de control para la regulación y monitoreo de las condiciones internas del secador solar térmico forzado híbrido	Sistema Plc	Redalyc
A4	[17]	Automatización del sistema de control de la máquina empaquetadora de Blíster.	Sistema PLc	Redalyc
A5	[18]	Web Client and SCADA Applications for Monitoring the "Cayo Santa María" Isolated Electric System	Sistema Scada	Redalyc
A6	[19]	Design and Implementation of a Fuzzy Controller for Frequency Control of a Motor in an S7-1200 PLC	Sistema PLC	Scopus
A7	[20]	Sistema de monitorización y control de un robot cartesiano en PLC	Sistema Scada	Scopus
A8	[21]	Surveillance task optimized by Evolutionary shared Tabu Inverted Ant Cellular Automata Model for swarm robotics navigation control	Algoritmo GIACA, computación natural.	Science Direct
A9	[22]	Diseño y construcción de un prototipo para control y monitoreo de reservas de agua con el empleado de comunicación movil GSM / GPRS en sistema de riego.	Modulo lógico siemens y Logo 230 RC	MDPI
A10	[23]	Prototipo de Celula Robotica para Manufactura	Sistema PLC	MDPI
A11	[24]	Electroactive polymer gels as probabilistic reservoir automata for computation	Computación de autómatas, Hidrogel EAP	Science Direct
A12	[25]	Cellular automata-based MapReduce design: Migrating a big data processing model from Industry 4.0 to Industry 5.0	Computación de autómatas, Hidrogel EAP	Science Direct
A13	[26]	Metodología para la elaboración de los programas a implementar en autómatas programables. MEPUS	Mepus, Sistema PLC	Science Direct
A14	[27]	A Microservice Approach for a Cellular Automata Parallel Programming Environment	Programación Modelos CA	Science Direct
A15	[28]	Numerical simulation for β/α transformation of Ti-6Al-4V alloy using a lattice Boltzmann - cellular automata method	Método de Boltzmann reticular, software CALPHAD	Scopus
A16	[29]	A review on regular clocking scheme in quantum dot cellular automata	Programación Modelos CA	Scopus
A17	[30]	Extending device noise measurement capacity for OFDM-based PLC systems: Design, implementation, and on-field validation	Sistema PLC	Scopus
A18	[31]	Adaptable and Interpretable Framework for Anomaly Detection in SCADA-based industrial systems	Sistema Scada	Web of Science
A19	[32]	Automated HMI design as a custom feature in industrial SCADA systems	Sistema Scada	Web of Science
A20	[32]	Implementation of control and SCADA system: Case study of Allen Bradley PLC by using WirelessHART to temperature control and device diagnostic	Sistema PLC/Scada	Web of Science
A21	[33]	Intelligent energy management based on SCADA system in a real Microgrid for smart building applications	Sistema Scada	Dialnet
A22	[34]	Improving the prediction of wind speed and power production of SCADA system with ensemble method and 10-fold cross-validation	Método de validación cruzada	Dialnet
A23	[35]	Design and Implementation of Control and Monitoring Systems Based on HMI-PLC for Potable Water Well	Sistema PLC	Science Direct
A24	[36]	Comparison of the performance of PID controller on level process using programmable logic controller and embedded systems	Método de validación cruzada	Dialnet
A25	[37]	A methodology to automaton synthetize in ground autonomous navigation systems control	software MATLAB	Dialnet
A26	[38]	Remote communication between plc for control of ac motors	Sistema Scada, software "Vijeo citect".	Dialnet
A27	[39]	Methodology for the Synthesis of Automata in the Planning of Movements for Autonomous Systems with Multiple Agents	Sistema PLC	Web of Science
A28	[40]	Sistema HMI-PLC-ADF- Motor CA para control de velocidad HMI-PLC-ADF-CA Motor system to speed control	Sistema PLC	Scopus

Se evidencia las ventajas de incursionar en el ámbito de los sistemas de control autómata. Actualmente, la alta demanda de productos y servicios ha provocado un impacto en la disponibilidad de materias primas necesarias para su fabricación. Por ello, se busca optimizar los procesos productivos para lograr beneficios económicos, sociales y medioambientales.

En las investigaciones A3, A4, A6, A10, A13, A17, A20, A23, A27 y A28 se utilizó una metodología conocida como sistema PLC para el control de procesos industriales y sistemas automatizados. Este sistema destaca por su robustez, flexibilidad y facilidad de programación, lo que permite el diseño e implementación eficiente de prototipos de control automático. En la programación de estos prototipos, el PLC emplea lenguajes específicos como Ladder Logic, Función de Bloques y texto estructurado, facilitando la creación de secuencias de control complejas. Además, su capacidad para interactuar con diversos sensores y actuadores posibilita la recolección y procesamiento de datos en tiempo real, optimizando así el rendimiento y la confiabilidad del sistema de control, según lo expresan los autores [16, 17, 23, 26, 30, 32, 35, 39].

Por otro lado, las investigaciones A5, A7, A18, A19, A21 y A26 se basaron en una metodología denominada sistema Scada, el cual consiste en supervisar, controlar y recopilar datos de procesos industriales en tiempo real. SCADA proporciona una interfaz gráfica para visualizar el estado del sistema, emitir comandos de control, y registrar datos históricos, facilitando la gestión y optimización de operaciones complejas. Este sistema es esencial para garantizar la eficiencia, seguridad y rendimiento de los procesos automatizados, según lo indican autores como [18, 20, 31, 32, 33].

La investigación A8 emplea la metodología Algoritmo GIACA, computación natural, esta se caracteriza por resolver problemas de cinemática inversa en la elaboración de prototipos de control automático. Este algoritmo emplea principios de evolución y selección natural para encontrar soluciones óptimas, permitiendo que un sistema autónomo determine las posiciones y movimientos necesarios para alcanzar un objetivo específico. A través de iteraciones y adaptaciones, GIACA mejora la precisión y eficiencia del sistema de control, optimizando su rendimiento en entornos dinámicos y complejos, como lo manifiesta [21].

La investigación A9 indican que la metodología que emplearon los autores se denomina, Modulo lógico siemens y Logo 230 RC, se utilizan en la creación de prototipos de control autónomo. Estos módulos permiten el control de procesos simples a través de su capacidad para ser programados con lógica de control básica. Caracterizados por su facilidad de uso, flexibilidad y capacidad de programación mediante software intuitivo, como LOGO!, según destaca [22].

Los artículos A11 y A12, están desarrollados mediante computación de autómatas, Hidrogel EAP, esta estudia sistemas de estados finitos para modelar y controlar comportamientos. Los hidrogeles EAP son polímeros que responden a estímulos eléctricos cambiando de forma. En un prototipo de control, los autómatas gestionan las señales eléctricas para activar el hidrogel EAP, permitiendo respuestas automáticas y adaptativas, según lo mencionan los autores [24, 25].

En los artículos A14 y A16 se utilizó la programación Modelos CA, la cual utiliza redes de celdas que evolucionan en función de reglas locales para simular sistemas complejos. En un prototipo de control autómata, los Modelos CA pueden modelar y predecir comportamientos emergentes y dinámicos del sistema, facilitando el diseño de controladores que responden a patrones y cambios en el entorno. Como lo mencionan [27, 29].

La investigación A15 utiliza el Método de Boltzmann reticular, software CALPHAD, usado en simulaciones estadísticas para modelar la evolución de sistemas materiales a nivel atómico, mientras que el software CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams) facilita el análisis de diagramas de fases y la predicción de propiedades materiales. En un prototipo de control autómata, estos métodos ayudan a diseñar materiales y componentes con propiedades específicas, mejorando la precisión y rendimiento del sistema, según [28].

En las investigaciones A22 y A24 se utilizó el Método de validación cruzada, la cual evalúa la precisión de un modelo de control dividiendo el conjunto de datos en múltiples subconjuntos, entrenando el modelo en algunos y probándolo en otros. En la elaboración de un prototipo de control autómata, esta técnica asegura que el sistema de control generalice bien a nuevos datos y condiciones, evitando el sobreajuste y mejorando la robustez del modelo en situaciones reales, como lo mencionan [34, 36].

La investigación A25 utiliza software MATLAB, el cual se encarga del control autómata para diseñar, simular y analizar algoritmos de control y sistemas dinámicos. Ofrece herramientas avanzadas para modelar sistemas, realizar simulaciones de comportamiento en diferentes escenarios y ajustar parámetros, facilitando el desarrollo y la optimización del prototipo antes de su implementación física, según [37].

Basado en la investigación realizada por [12] se procede en la Figura 3, a escoger las variables de estudio para posteriormente desglosar sus tópicos. Se puede apreciar la debida ponderación de las herramientas para el diseño de prototipo de control autómata:

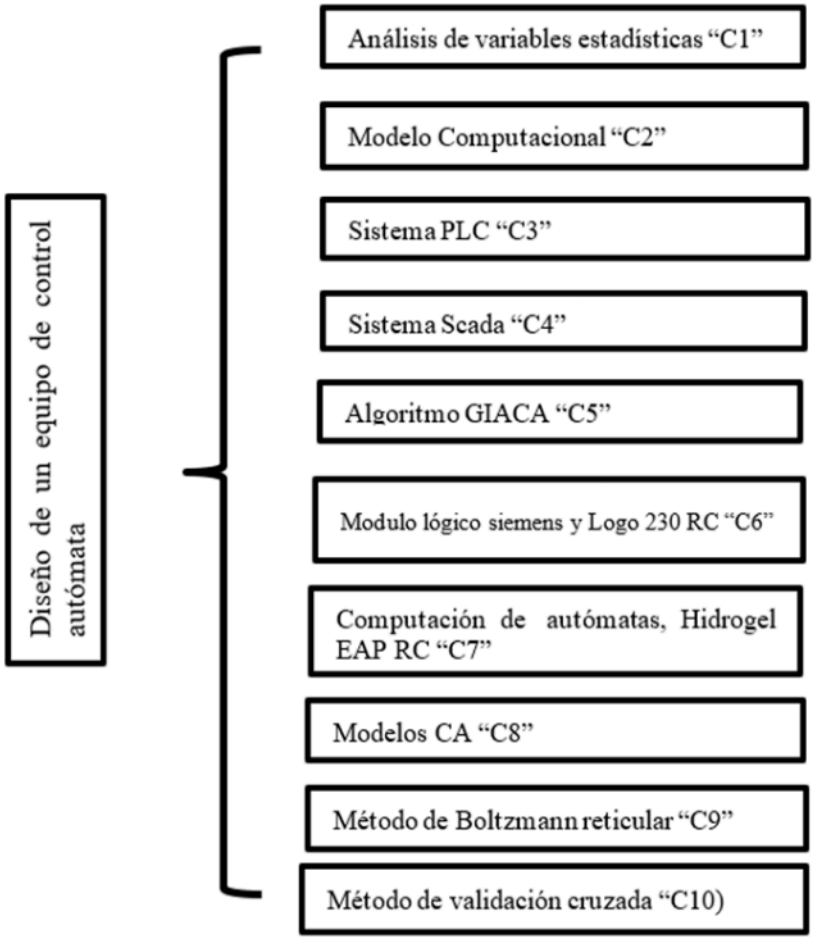


Figura 3: *Herramientas identificadas en la matriz referencial*

En la Tabla 2, se presenta una matriz de criterios en comparación, basada en el método de Saaty. Este método permite asignar un valor ponderado que refleja la importancia relativa entre los criterios, con los valores definidos situados en la diagonal principal. Por ejemplo, si se asigna una ponderación a $C1C4$, su inverso $C4C1$ será igual a $1/C1C4$, y así sucesivamente hasta completar toda la matriz de comparación.

Tabla 2: *Matriz de criterios método Saaty*

	Criterios									
	C1	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**	**C6**	**C7**	**C8**	**C9**	**C10**
C1	1,00	0,50	0,14	0,20	2,00	3,00	3,00	3,00	0,50	0,50
C2	2,00	1,00	0,28	0,40	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	0,66
C3	7,00	3,50	1,00	1,40	3,50	3,50	3,50	3,50	7,00	2,33
C4	2,00	2,50	0,71	1,00	2,50	2,50	2,50	2,50	5,00	1,66
C5	0,50	0,50	0,28	0,40	1,00	0,20	0,20	0,20	0,50	0,50
C6	0,33	0,50	0,28	0,40	5,00	1,00	0,71	0,71	0,40	0,40
C7	0,33	0,50	0,28	0,40	5,00	1,40	1,00	3,00	2,00	5,00
C8	0,33	0,50	0,28	0,40	5,00	1,40	0,33	1,00	1,50	1,50
C9	2,00	1,00	0,14	0,20	2,00	2,50	0,50	0,66	1,00	1,50
C10	2,00	1,51	0,43	0,60	2,00	2,50	0,20	0,66	0,66	1,00
Total	17,49	12,01	3,82	5,40	30,00	20,00	13,94	17,23	19,56	15,05

En la Tabla 3, se muestran los datos de la matriz normalizada, dividiendo el valor de cada celda de la matriz por el resultado total de la columna, así como los pesos de la matriz normalizada, tomando el promedio con relación a la fila de criterios, de esta manera se puede observar que son dos criterios que se destacan entre los demás criterios, lo que significa que los buenos $C3$ y $C4$ tienen consideraciones más importantes en comparación con otros criterios.

Tabla 3: *Matriz de ponderación final*

	Matriz normalizada										**Pond**
C1	0,057	0,042	0,037	0,037	0,067	0,150	0,215	0,174	0,026	0,033	0,084
C2	0,114	0,083	0,073	0,074	0,067	0,100	0,143	0,116	0,051	0,044	0,087
C3	0,400	0,291	0,262	0,259	0,117	0,175	0,251	0,203	0,358	0,155	0,247
C4	0,114	0,208	0,186	0,185	0,083	0,125	0,179	0,145	0,256	0,110	0,159
C5	0,029	0,042	0,073	0,074	0,033	0,010	0,014	0,012	0,026	0,033	0,035
C6	0,019	0,042	0,073	0,074	0,167	0,050	0,051	0,041	0,020	0,027	0,056
C7	0,019	0,042	0,073	0,074	0,167	0,070	0,072	0,174	0,102	0,332	0,112
C8	0,019	0,042	0,073	0,074	0,167	0,070	0,024	0,058	0,077	0,100	0,070
C9	0,114	0,083	0,037	0,037	0,067	0,125	0,036	0,038	0,051	0,100	0,069
C10	0,114	0,126	0,112	0,111	0,067	0,125	0,014	0,038	0,034	0,066	0,081

En la Tabla 4, se realizan los cálculos de la matriz para obtener los resultados del índice de consistencia, los cuales se detallan a continuación:

Tabla 4: *Cálculo índice de consistencia en matriz*

											suma
C1	0,08	0,04	0,04	0,03	0,07	0,17	0,34	0,21	0,03	0,04	1,06
C2	0,17	0,09	0,07	0,06	0,07	0,11	0,22	0,14	0,07	0,05	1,06
C3	0,59	0,30	0,25	0,22	0,12	0,20	0,39	0,25	0,48	0,19	2,99
C4	0,17	0,22	0,18	0,16	0,09	0,14	0,28	0,18	0,34	0,13	1,88
C5	0,04	0,04	0,07	0,06	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	0,04	0,38
C6	0,03	0,04	0,07	0,06	0,17	0,06	0,08	0,05	0,03	0,03	0,62
C7	0,03	0,04	0,07	0,06	0,17	0,08	0,11	0,21	0,14	0,40	1,32
C8	0,03	0,04	0,07	0,06	0,17	0,08	0,04	0,07	0,10	0,12	0,79
C9	0,17	0,09	0,04	0,03	0,07	0,14	0,06	0,05	0,07	0,12	0,82
C10	0,17	0,13	0,11	0,10	0,07	0,14	0,02	0,05	0,05	0,08	0,91

En la Tabla 5 se muestra el índice de consistencia del IC con cada fórmula y la consistencia aleatoria con cada fórmula, dando como resultado un valor de relación de consistencia de 0,0077. Según la metodología de Saaty, sí se ha ponderado racionalmente el ratio de consistencia $CR < 0,1$ y los resultados son dignos de selección.

Tabla 5: *Resultados del índice de consistencia*

		MAX	0,160
	AXP		
C1	0,088	Índice de consistencia	
C2	0,092	$CI = (nmax - n)/(n-1)$	0,012215637
C3	0,738		
C4	0,299	Consistencia aleatoria	
C5	0,013	$RI = (1{,}98 * (n-2)/n$	1,584
C6	0,035		
C7	0,149	Relación de consistencia	
C8	0,055	$CR = CI/RI$	0,007711892
C9	0,057		
C10	0,073		

En la Figura 4, se evidencia en primer lugar, el Modelo de sistema PLC, mientras que en segundo lugar se encuentra el Modelado de sistema Scada, siendo estos los métodos más factibles para esta investigación.

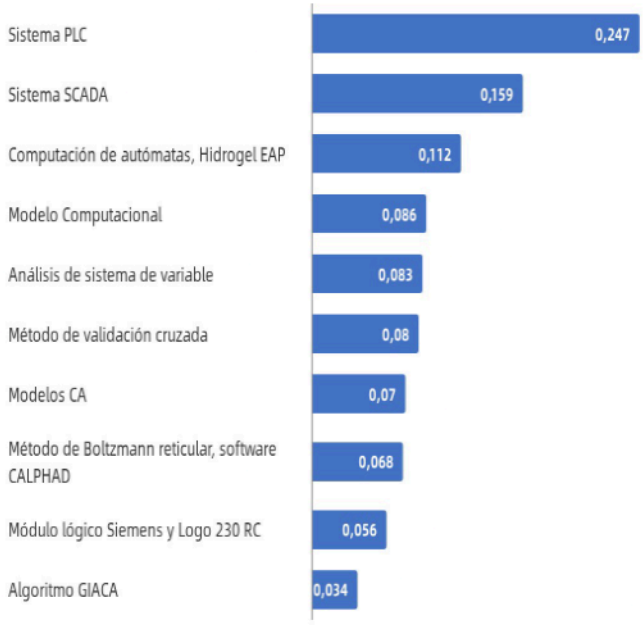


Figura 4: *Resultados de criterios evaluados*

4. Discusión

La revisión de la literatura permitió identificar, analizar y seleccionar estudios de fuentes confiables. Los motores de búsqueda elegidos proporcionaron el nivel de conocimiento necesario para comenzar a desarrollar un tema. En ellos se encontraron diversas herramientas con enfoques circulares, cuyas características ideales se convertirán en la base fundamental de la investigación.

Los investigadores utilizan diversas herramientas para ejecutar metodologías eficientes en el diseño de prototipos de control automático. En el artículo A1, se emplearon plataformas y herramientas centradas en el análisis de variables estadísticas, lo cual implica evaluar y optimizar el rendimiento de los sistemas. Esto incluye la recopilación de datos, la identificación de patrones y tendencias, y la utilización de estos hallazgos para ajustar los parámetros del sistema, mejorando así la eficiencia, estabilidad y respuesta del control automático, como lo evidencian [14].

El articulo A2 está desarrollado mediante un modelo computacional basado en entrada y salida, el mismo que radica en la creación de una representación digital del sistema de control. Este modelo simula el comportamiento del sistema mediante el uso de algoritmos y ecuaciones matemáticas, permitiendo predecir y analizar su desempeño en diversas condiciones, según lo menciona el autor [15].

El sistema PLC en conjunto con el sistema Scada forman una metodología efectiva con herramientas útiles para identificar, analizar y diseñar prototipos de control automatizado que favorezcan a la empresa. La implementación de esta metodología es fundamental en la investigación propuesta, puesto que ofrece numerosas oportunidades para la innovación, la sostenibilidad y el impulso de la producción limpia.

En cuanto a las tecnologías emergentes en el ámbito de la automatización industrial, se enfatiza la adopción de controladores lógicos programables (PLC) y su impacto positivo en la eficiencia operativa. Además, se destacan las aplicaciones específicas de los PLC en América Latina, subrayando la relevancia de estas tecnologías en entornos industriales complejos y variables. La revisión de literatura revela que la implementación de sistemas automatizados no solo mejora la eficiencia, asimismo contribuye a una mayor sostenibilidad y calidad en la producción, lo cual es crucial para las fincas bananeras que compiten en mercados globales.

5. Conclusiones

Esta investigación demuestra que los sistemas de control automático, particularmente PLC y SCADA, son herramientas clave para mejorar la eficiencia y sostenibilidad en la producción bananera. Los PLC destacan por su flexibilidad de programación y capacidad de integración con sensores, logrando mejoras del 20-30 % en eficiencia operativa, mientras que los SCADA proporcionan supervisión en tiempo real y análisis de datos. El análisis mediante el método Saaty confirmó su superioridad técnica, con un índice de consistencia de 0,0077. Estas tecnologías no solo optimizan recursos, sino que también mejoran la competitividad global mediante producción limpia y trazable.

Además de estas soluciones establecidas, metodologías innovadoras como algoritmos GIACA e hidrogeles EAP, muestran potencial para desarrollar sistemas más adaptativos y precisos. Su implementación en el sector bananero ecuatoriano, junto con capacitación técnica y políticas de apoyo, podría transformar la producción hacia un modelo circular y automatizado. Este estudio sienta las bases para modernizar la agricultura mediante tecnologías que equilibren productividad y sostenibilidad ambiental.

Referencias

[1] A. Salkic, H. Muhovic, and D. Jokic, "Siemens S7-1200 PLC DC Motor control capabilities," in IFAC-PapersOnLine, Elsevier B.V., 2022, pp. 103–108. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.06.017.

[2] H. David Pácz-Logreira, R. Zamora-Musa, J. Bohórquez-Pérez, H. Pácz-Logreira, and R. P. Zamora-Musa - José Bohórquez-Pérez, "Programación de Controladores Lógicos (PLC) mediante Ladder y Lenguaje de Control Estructurado (SCL) en MATLAB Programming logic controllers (PLC) using ladder and structured control language (SCL) in MATLAB Programação de Controladores Lógicos (PLC) mediante Ladder e Linguagem de Controle Estruturado (SCL) em MATLAB," Revista Facultad de Ingeniería (Fac. Ing.), Mayo-Agosto, vol. 24, no. 39, pp. 109–119, 2020.

[3] M. M. Reyes, "Autonomous weapons systems and IHL. Warning of the near future," Ius et Veritas, vol. 2021, no. 63, pp. 179–191, 2021, doi: 10.18800/iusetveritas.202102.009.

[4] W. W. Natee Thong-un, "Productivity enhancement using low-cost smart wireless programmable logic controllers: A case study of an oyster mushroom farm," Comput Electron Agric, vol. 195, Mar. 2022.

[5] M. H. Rais, R. A. Awad, J. Lopez, and I. Ahmed, "Memory forensic analysis of a programmable logic controller in industrial control systems," Forensic Science International: Digital Investigation, vol. 40, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.fsidi.2022.301339.

[6] A. M. Porcelli, "La inteligencia artificial aplicada a la robótica en los conflictos armados. Debates sobre los sistemas de armas letales autónomas y la (in) suficiencia de los estándares del derecho internacional humanitario.," Estudios Socio-Jurídicos, vol. 23, no. 1, Jan. 2021, doi: 10.12804/revistas.urosario.edu.co/sociojuridicos/a.9269.

[7] J. Menber Nuñes, A. Rodriguez Benites, and D. Oliveira Diaz, "Tools for the Implementation of a SCADA System in a Desalination Process," IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, vol. 17, pp. 14–24, 2018.

[8] J. Herrera, M. Barrios, and S. Pérez, "Diseño e implementación de un sistema scada inalámbrico mediante la tecnología zigbee y arduino," 2014.

[9] G. Dhanabalan, S. T. Selvi, and M. Mahdal, "Scan Time Reduction of PLCs by Dedicated Parallel-Execution Multiple PID Controllers Using an FPGA," Sensors, vol. 22, no. 12, Jun. 2022, doi: 10.3390/s22124584.

[10] D. Chambergo-Michilot, M. E. Diaz-Barrera, and V. A. Benites-Zapata, "Revisiones de alcance, revisiones paraguas y síntesis enfocada en revisión de mapas: aspectos metodológicos y aplicaciones," Jan. 01, 2021, NLM (Medline). doi: 10.17843/rpmesp.2021.381.6501.

[11] P. K. Grijalva et al., "Herramientas colaborativas para revisiones sistemáticas," 2019.

[12] Š. Kudláč, V. Štefancová, and J. Majerčák, "Using the Saaty Method and the FMEA Method for Evaluation of Constraints in Logistics Chain," in Procedia Engineering, Elsevier Ltd, 2017, pp. 749–755. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.433.

[13] N. Ollora Triana, E. Isidori, and E. M. López Perea, "Práctica de danza como actividad saludable a lo largo de la vida. Revisión de alcance," Sportis. Scientific Journal of School Sport, Physical Education and Psychomotricity, vol. 9, no. 2, pp. 366–387, May 2023, doi: 10.17979/sportis.2023.9.2.9371.

[14] R. M. Fernandes, M. L. D. S. Maciel, A. V. de Souza, L. G. de M. Amaral, and N. de O. Amaral, "Evaluation of an automated temperature control equipment for lactating sows," Acta Sci, vol. 45, 2023, doi: 10.4025/actascianimsci.v45i1.54981.

[15] M. Cornelio, G. González, and S. Ching, "Cómo citar el artículo Número completo Más información del artículo Editorial Ediciones Futuro," Revista cubana de ciencias imformaticas., vol. 15, no. 2, pp. 77–95, 2021.

[16] P. J. Molina Hernandez, G. Castro-Badilla, and T. de J. Guzmán Hernández, "Diseño e implementación de un sistema automático de control para la regulación y monitoreo de las condiciones internas del secador solar térmico forzado híbrido," Tecnología en marcha, vol. 35, pp. 94–116, 2022.

[17] M. Araujo and M. José, "Automatización del sistema de control de la máquina empaquetadora de Blíster. Automation control system of the blisters machine packaging," 2018. Accessed: Jul. 31, 2024. [Online]. Available: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=688773637003.

[18] S. E. Samada Rigo, A. S. Martinez laguardia, and O. Pozo Mederos, "Web Client and SCADA: Applications for Monitoring the 'Cayo Santa María' Isolated Electric System," Sistema y Telematica, vol. 16, pp. 59–70, 2018, doi: 10.18046/syt.v16i47.3216.

[19] E. S. Portillo and J. L. O. Avila, "Design and implementation of a fuzzy controller for frequency control of a motor in an S7-1200 PLC," in Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2020. doi: 10.18687/LACCEI2020.1.1.490.

[20] J. Lozano, A. José Calderon, M. Miñambres, and A. Tómas peréz, "Sistema de monitorización y control de un robot cartesiano en PLC," Actas de las XXXVII Jornadas de Automática, pp. 1030–1036, 2016, Accessed: Aug. 01, 2024. [Online]. Available: https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/29220.

[21] H. J. M. Lopes and D. A. Lima, "Surveillance task optimized by Evolutionary shared Tabu Inverted Ant Cellular Automata Model for swarm robotics navigation control," Results in Control and Optimization, vol. 8, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.rico.2022.100141.

[22] H. Miranda Ruiz and G. Chafla Altamirano, "Diseño y construcción de un prototipo para control y monitoreo de reservas de agua con el empleado de comunicación movil GSM / GPRS en sistema de riego.," SATHIRI, vol. 9, pp. 193–201, 2015, Accessed: Aug. 01, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.32645/13906925.462.

[23] I. Viveros, S. R. Toledo Martínez, J. Muñoz Delgado, and R. Zamudio Reyes, "Prototipo de Celula Robotica para Manufactura," in NNODOCT, Universitat Politecnica de Valencia, May 2019, pp. 14–16. doi: 10.4995/inn2018.2018.8849.

[24] V. Strong, W. Holderbaum, and Y. Hayashi, "Electroactive polymer gels as probabilistic reservoir automata for computation," iScience, vol. 25, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.isci.2022.105558.

[25] A. Mitra, "Cellular automata-based MapReduce design: Migrating a big data processing model from Industry 4.0 to Industry 5.0," e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, vol. 8, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.prime.2024.100603.

[26] J. M. Diez, R. Montoya, and P. A. Blasco, "Metodología para la elaboración de los programas a implementar en autómatas programables. MEPUS," RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial, vol. 13, no. 3, pp. 322–329, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.riai.2016.03.006.

[27] A. Vivas and J. Sanabria, "A Microservice Approach for a Cellular Automata Parallel Programming Environment," Electron Notes Theor Comput Sci, vol. 349, pp. 119–134, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.entcs.2020.02.016.

[28] W. Lee, Y.-T. Hyun, J. W. Won, and J. Yoon, "Numerical simulation for β/α transformation of Ti-6Al-4V alloy using a lattice Boltzmann - cellular automata method," Journal of Materials Research and Technology, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.07.235.

[29] M. Goswami, T. J. Sharma, and A. N. Boruah, "A review on regular clocking scheme in quantum dot cellular automata," e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, vol. 8, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.prime.2024.100588.

[30] A. Omri, J. Hernandez Fernandez, and R. Di Pietro, "Extending device noise measurement capacity for OFDM-based PLC systems: Design, implementation, and on-field validation," Computer Networks, vol. 237, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.comnet.2023.110038.

[31] M. Wadinger and M. Kvasnica, "Adaptable and Interpretable Framework for Anomaly Detection in SCADA-based industrial systems," Expert Syst Appl, vol. 246, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2024.123200.

[32] M. Šverko and T. G. Grbac, "Automated HMI design as a custom feature in industrial SCADA systems," in Procedia Computer Science, Elsevier B.V., 2024, pp. 1789–1798. doi: 10.1016/j.procs.2024.02.001.

[33] M. Kermani, B. Adelmanesh, E. Shirdare, C. A. Sima, D. L. Carnì, and L. Martirano, "Intelligent energy management based on SCADA system in a real Microgrid for smart building applications," Renew Energy, vol. 171, pp. 1115–1127, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.03.008.

[34] S. M. Malakouti, "Improving the prediction of wind speed and power production of SCADA system with ensemble method and 10-fold cross-validation," Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, vol. 8, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.cscee.2023.100351.

[35] Q.-Q. J. Carlos, F.-G. Ernesto, B.-L. Jorge, and Q.-A. Víctor, "Design and Implementation of Control and Monitoring Systems Based on HMI-PLC for Potable Water Well," Ingeniería Investigación y Tecnología, vol. XV, no. 1, pp. 41–50, 2017.

[36] L. Antonio, B. Varon, J. Gonzalo Álvarez, and W. M. Arenas, "Comparison of the performance of PID controller on level process using programmable logic controller and embedded systems," 2021.

[37] J. Luis, M. Valencia, M. H. Londoño, G. Andrés, and H. Londoño, "A methodology to automaton synthetize in ground autonomous navigation systems control," Scientia et Technica Año XXIII, vol. 23, no. 04, 2019.

[38] C. Durán Acevedo and H. Ávila Peñaloza, "Remote communication between plc for control of ac motors," ecnologías de Avanzada, pp. 85–90, 2018, Accessed: Aug. 01, 2024. [Online]. Available: https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/article/view/1929.

[39] J. L. Martínez Valencia, M. Holguín Londoño, and C. alberto Ramirez vanegas, "Metodología para la síntesis de autómatas en la planificación de movimientos en sistemas autónomos con múltiples agentes," Tecnura, vol. 25, no. 70, pp. 46–70, Oct. 2021, doi: 10.14483/22487638.17131.

[40] A. Caselles Osorio, G. Mendoza P, M. Simanca Ospino, I. M. Romero Borja, J. E. Mosquera Ruiz, and P. Eslava Eljash, "Tomato (Lycopersicum sculentum) production in sub surface flow constructed wetlands for domestic wastewater treatment in rural a colombian community," Ingeniería Investigación y Tecnología, vol. 19, no. 4, pp. 1–10, Oct. 2018, doi: 10.22201/fi.25940732e.2018.19n4.038.

IDEAS

Innovation & Development in Engineering and Applied Science

Journal homepage: https://revistasojs.utn.edu.ec/index.php/ideas

Integración de la tecnología en la distribución de planta: Una revisión bibliográfica

Integration of Technology in Plant Layout: A Bibliographic Review

Karina Valenzuela-Burbano[a], Andrés Lavayen-Egas[a], Joseph Quintero-Herrera[a] y Jefferson Ronquillo-Alvarado[a]

[a] Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad de Guayaquil, Av. Las Aguas, Guayaquil 090501, Ecuador.

Enviado: 30/03/2023, Aceptado: 03/08/2023, Publicado: 30/01/2026
Autor de correspondencia:
Karina Valenzuela: karina.valenzuelab@ug.edu.ec
DOI: 10.53358/ideas.v8i1.875

PALABRAS CLAVE

Distribución,
Eficiencia,
Inteligencia Artificial,
IoT,
Realidad virtual y aumentada.

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo principal la realización de una revisión bibliográfica acerca de estudios y proyectos que se han llevado a cabo en el tema de la integración de la tecnología en el campo de la distribución de planta, a fin de comprobar si dentro de los últimos cinco años ha existido una mejora o, por el contrario, se sigue manteniendo esa abstinencia debido a todos los factores de riesgo. Como métodos y materiales empleados, se trabajó mediante un proceso metodológico riguroso y bien estructurado de un total de cuatro bases bibliográficas; se inició con la búsqueda y análisis de diversos tipos de publicaciones relacionadas con la distribución de planta y la integración de tecnologías como realidad virtual, realidad aumentada, internet de las cosas e inteligencia artificial. Finalmente, se concluye que existe una aceptación mucho más eficiente en comparación con otros años.

KEYWORDS

Distribution,
Eficiency,
Artificial Intelligence.
IoT,
Virtual and augmented reality,

ABSTRACT

The main objective of the present study is to carry out a bibliographic review of studies and projects that have been carried out on the subject of technology integration in the field of plant distribution, in order to verify if within the last five years there has been an improvement or, on the contrary, this abstinence continues to be maintained due to all the risk factors. As methods and materials used, we worked through a rigorous and well-structured methodological process of a total of four bibliographic bases; we started with the search and analysis of various types of publications related to plant distribution and the integration of technologies such as virtual reality, augmented reality, internet of things and artificial intelligence. Finally, it is concluded that there is a much more efficient acceptance compared to other years.

1. Introducción

La distribución de planta es un aspecto fundamental en la gestión de la producción de una empresa. Una buena distribución puede mejorar la eficiencia, reducir los costos de producción y mejorar la calidad del producto final. Sin embargo, diseñar y optimizar una distribución de planta eficiente puede ser un desafío, especialmente en un entorno empresarial en constante cambio. En este contexto, la tecnología puede ser una herramienta valiosa para mejorar la eficiencia de la distribución de planta. En ese sentido, el problema que se refleja a nivel de esta investigación se asocia con la carencia de incursión y predisposición que presentan las organizaciones para adoptar la tecnología como una herramienta que les ayude a implementar una mejora en sus procesos productivos. La falta de eficiencia en esta puede llevar a una disminución en la producción, un aumento en los costos y una disminución en la calidad del producto final. Además, la complejidad de los sistemas puede llevar a errores humanos y aumentar el tiempo de inactividad. En este contexto, la integración de la tecnología en la distribución de planta puede ser una solución valiosa para mejorar la eficiencia y reducir los costos.

A partir de ello, el objetivo del presente estudio se centra en realizar una revisión bibliográfica acerca de estudios y proyectos que se hayan llevado a cabo en el tema de la integración de la tecnología en el campo de la distribución de planta, a fin de llegar a comprobar si dentro de los últimos cinco años ha existido una mejora o, por el contrario, se sigue manteniendo esa abstinencia debido a todos los factores de riesgo. Se espera realizar una comparativa en relación con el porcentaje de empresas que decidieron optar por hacer uso de la tecnología como una estrategia para mejorar la distribución de planta, con aquellas que hasta la actualidad se siguen manteniendo al margen.

En la actualidad el proceso de distribución de planta ha ido adquiriendo un auge, dado que los avances tecnológicos permiten otorgar una facilidad a los empresarios respecto al manejo de sus procesos productivos, las empresas deciden invertir en sistemas de información que les permitan mantener automatizados sus procesos, lo cual aseguran, y, se trata de una inversión totalmente recuperable, dado que a partir de ello pueden obtener ventajas como, la optimización de trabajo y la reducción de costos [1].

Con el crecimiento de la economía en los países del mundo, específicamente en lo que respecta a términos de beneficios y poder adquisitivo, se ha potenciado la demanda de herramientas tecnológicas, porque la extensión industrial requiere de procesos mucho más asertivos y ágiles, que han usado de metodologías eficaces, mediante las cuales ayude a contribuir al desarrollo económico de cada nación. Y, respecto a ello, el consumidor también se muestra exigente a medida en que se otorga una mejora palpable en el producto o servicio que se le está ofreciendo, lo cual amerita que esto se compense a partir de material de consumo mucho más avanzado.

La integración de la tecnología en la distribución de planta puede proporcionar varios beneficios, como una mayor eficiencia, reducción de costos, mayor flexibilidad y capacidad de respuesta a los cambios en la demanda del mercado. Además, la tecnología puede ayudar a las empresas a mejorar la seguridad y la ergonomía del lugar de trabajo, reduciendo así los accidentes laborales y la fatiga de los trabajadores. En particular, la internet de las cosas (IoT), la realidad virtual y aumentada (RV/RA) y la inteligencia artificial (IA) pueden ser tecnologías valiosas para mejorar la eficiencia y precisión en la distribución de planta.

Con la distribución de planta se refiere a la disposición física de los recursos de producción, incluyendo maquinaria, equipos, personas y materiales, para optimizar la eficiencia y minimizar los costos. La eficiencia de la distribución de planta se puede medir por la velocidad y la precisión con la que se puede completar un proceso de producción. La IoT puede proporcionar una mayor visibilidad y control sobre los procesos de producción, permitiendo una mayor precisión en la distribución de planta. La RV/RA puede ayudar a los gerentes y trabajadores a visualizar los procesos de producción de manera más efectiva y a detectar problemas potenciales antes de que ocurran. La IA puede ayudar a optimizar los procesos de producción y a predecir la demanda del mercado con mayor precisión.

Esto implica la aplicación de sistemas tecnológicos en el diseño y optimización de la distribución de planta de una empresa. La IoT puede permitir la recopilación y el análisis de datos en tiempo real, lo que puede ayudar a los gerentes a tomar decisiones más informadas sobre la distribución de planta. Los sistemas tecnológicos pueden incluir software y hardware especializados, como robots, sensores y sistemas de seguimiento de procesos. Para integrar estos sistemas en la distribución de planta, las empresas deben tener un conocimiento sólido de las tecnologías disponibles, así como de los procesos de la empresa y las necesidades de los clientes. Además, las empresas deben ser capaces de implementar y mantener estos sistemas de manera efectiva para garantizar su éxito.

De acuerdo con lo expuesto previamente, se puede apreciar cuán importante es la distribución de planta en la sociedad, lo cual compromete aspectos asociados no solamente con el bienestar de los colaboradores que trabajan internamente en las organizaciones, sino también con los consumidores, quienes son los que deciden si una marca realmente se encuentra generando resultados positivos o no.

1.1. Antecedentes

En primera instancia se hace mención al trabajo desarrollado por [2], cuyo objetivo se centró en llevar a cabo un rediseño de la distribución del área de envasado para una empresa en la ciudad de Guayaquil, para lo cual, el autor aborda el problema de la situación actual mediante una evaluación de la gestión de procesos, a fin de conocer de qué forma incidía en la operatividad, y a partir de ello poder establecer una reducción en las falencias detectadas, específicamente en la reducción de tiempos y costos. A partir de ello, se propuso emplear una metodología basada en el estudio de campo y la aplicación de una mejora sustancial, basada en un sistema automatizado de información, el cual hiciera uso de indicadores a través del uso de herramientas para inteligencia de negocios. Como resultados obtenidos en cuanto a la metodología aplicada, se obtuvo la minimización de los tiempos de producción de parte de los colaboradores de la empresa, reduciendo así los procesos de fabricación y aumentando la productividad, lo cual permitió reducir los costos de la maquinaria y equipos de forma significativa.

Dentro del mismo contexto, [3] propuso un estudio donde se analizó el proceso de la distribución de planta y su incidencia en el proceso de producción en una empresa manufacturera, donde se tuvo como objetivo otorgar una mejora ante la problemática presentada en el área de producción de la empresa, a través del software WinQSB. El método empleado para llevar a cabo el estudio fue el cuantitativo, de investigación aplicada, donde se realizó una encuesta a fin de conocer el criterio y opinión del personal administrativo y de operación de la entidad. Como resultados obtenidos se logró conseguir una productividad mayor gracias a los indicadores de rendimiento, se eliminaron aquellos tiempos innecesarios que ocasionaban retrasos, aprovechando mucho más la disponibilidad de los colaboradores.

Seguido de ello, también se expresa este tema en el estudio de [4], su tema se basó en la mejora de la distribución de planta para potenciar la productividad de la organización, el objetivo principal de esta investigación fue la elaboración de una propuesta de redistribución de planta, a fin de comprobar si a partir de dicha implementación se ayuda a incrementar la productividad. Como metodología y herramientas, se empleó la observación directa y una entrevista dirigida al gerente de la empresa, así mismo, para la elaboración de la propuesta se hizo uso de herramientas para modelamiento de procesos, diagramas de operaciones, entre otros. Se aplicó el método de Guerchet a fin de evaluar cada una de las áreas correspondientes, diagramas relacionales, que permitieron establecer una técnica de distribución de planta apropiada. Como resultados del estudio se obtuvo que, la productividad pasó de un valor de 0.17 servicios a 0.18 servicios, permitiendo la obtención de costos mucho más bajos y convenientes para la organización.

Finalmente, [5] también aporta con su tema asociado a la distribución de planta como estrategia para la optimización de recursos materiales de una empresa dedicada a la comercialización de calzado, cuyo objetivo se centra en llevar a cabo una redistribución que ayude a solventar las falencias, tales como: retraso en la operatividad, exceso de pérdida de tiempo, entre otros aspectos. El método empleado fue el SPL, mediante lo cual se pudo dar a conocer los nexos existentes prioritarios entre las áreas de trabajo, permitiendo que se consolide una distribución de planta nueva a través del software WinQSB. Como resultados obtenidos, se ayudó a facilitar y mejorar las condiciones de trabajo de los colaboradores de la entidad. En consecuencia, con los antecedentes expuestos anteriormente, es evidente cuán importante se considera la distribución de planta dentro de una empresa, razón por la cual se da origen a este estudio, donde se abordará una revisión exhaustiva mediante la cual se puede identificar la varianza o permanencia de la adopción de herramientas, medios y estrategias de carácter tecnológico. A continuación, se procede a exponer algunos aspectos importantes en esta revisión.

1.2. Evolución de la industria a través de la tecnología

Actualmente las organizaciones se ven en la necesidad de convertir sus negocios apegado a la evolución y nuevas tendencias tecnológicas del mercado, siendo algunas de las razones de su adopción, la satisfacción de la demanda de clientes, así como la construcción de bases sólidas que les permitan afianzar cualquier tipo de crisis financiera o empresarial en el futuro. A raíz de ello, se puede mencionar que entre las razones más concretas del por qué las entidades optan por transformar su empresa en función de los avances tecnológicos, se le atribuye a sus múltiples puntos favorecedores y beneficios, tales como la optimización de procesos, disminución de costos, potenciación de la productividad, y mejora en la calidad de productos o servicios. En ese sentido, el presente trabajo se enfoca en analizar la forma en cómo dicha transformación ha logrado construir nuevas oportunidades en las distintas organizaciones a nivel mundial, analizando cada una de las herramientas, métodos, estrategias, entre otros aspectos que ayuden a demostrar su efectividad. Así mismo, gracias a la evolución de la tecnología es posible que exista una mayor competitividad en el mercado empresarial, dado que la demanda de exigencia será mucho mayor, por lo cual cada una de las organizaciones muchas veces suelen a orientarse a dos aspectos importantes para mantenerse firmes ante las demás empresas, y estas se conciben como calidad y resultados positivos.

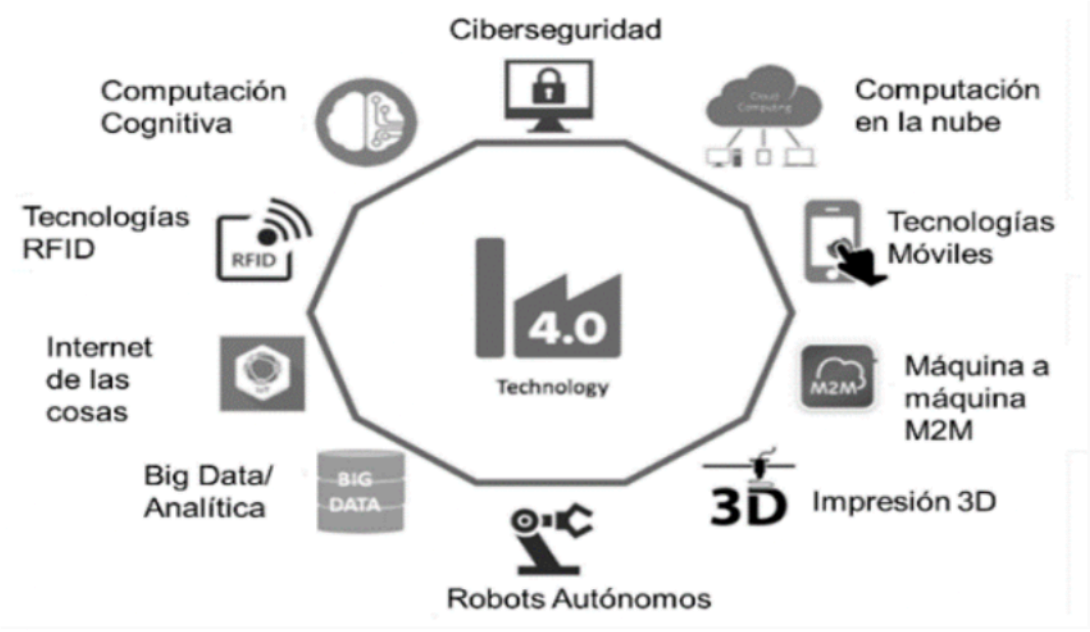


Figura 1: *Adaptado de Proposal of an automation solutions architecture for Industry 4.0," Destech Trans. Eng. Technol. Res., Mar. 2017 [6]*

Según manifiesta [7], la cuarta revolución industrial hace referencia a una asociación de medios y aspectos tecnológicos, los cuales van desarrollándose, a fin de dejar atrás todo lo manejado de manera física, migrando así hacia los procesos automatizados, que ayudarán a modificar la visión de las empresas, reduciendo lo monótono y transformándolo en optimización.

Sin embargo, actualmente la industria 4.0 no puede avanzar más allá de lo que se ha establecido con aquellas empresas transformadoras, dado que se trata de un reto de nivel mundial el que se adopte este tipo de industria, lo cual, en parte se debe a la falta de vías de desarrollo sostenible y falta de inversión de parte de los países que les permitan adentrarse al cien por ciento en estos avances [8].

1.3. Beneficios de emplear la tecnología en la distribución de planta

Una distribución de planta funciona bien siempre y cuando exista una adecuación y coordinación de los procesos internos y externos de fábrica, sin embargo, resulta claro que para todas las organizaciones esto dependerá de la forma en cómo se trabajen estos, así como también la predisposición del personal operativo de planta.

A raíz de ello, es importante tomar en cuenta que existen diversos factores que contribuyen a que exista un desface en las operaciones manejadas dentro de la entidad, lo cual amerite lo que se conoce como una "redistribución de planta" según menciona [8]. Entre algunas de estos factores que ocasionan que se realice una redistribución, se mencionan los siguientes:

- **Cambios de ubicación:** puede darse debido a que el lugar donde se encuentra situada la planta sea evidentemente pequeño y sin posibilidades de poderse extender a futuro.
- **Aumento del volumen de producción, demandando una mejor alternativa para aprovechar el espacio:** en el caso de departamento y áreas que realmente no aportan a la productividad, pueden ser reemplazadas por salas de operación de cómputo, mediante las cuales se tenga la posibilidad de acceder a un mayor control de los procesos realizados en las distintas áreas de la entidad.
- **Incorporación de nuevos equipos:** al querer cambiar la modalidad de control de los procesos operativos mediante la incorporación de equipos tecnológicos que propicien una gestión mucho más apropiada, puede tomar algo de tiempo el que los colaboradores logren adaptarse a dichos cambios, especialmente si se desea que los sistemas funcionen según lo esperado.

- **Problemas de flujo de materiales:** este problema va de la mano con lo especificado anteriormente, dado que, al incorporar maquinaria nueva, existe la consecuencia de la reducción de los costes derivados de la puesta en marcha.

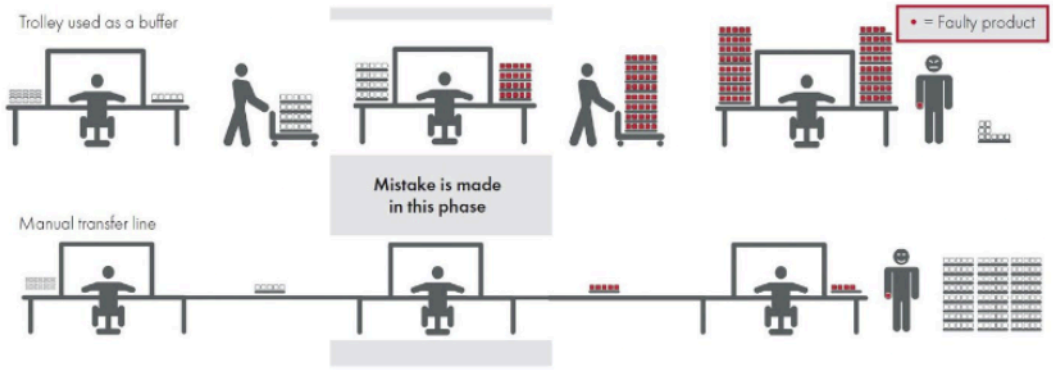


Figura 2: *Redistribución de planta debido a la incorporación de la tecnología. Adaptado de Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo 2022. [9]*

Por su parte, se añade que los beneficios para llevar una correcta distribución de planta no se conciben como otro que el encontrar una manera organizada de colocar la maquinaria, equipos y demás departamentos existentes dentro de la fábrica. En ese sentido, se establecen los siguientes beneficios como parte de una correcta distribución de planta a través de la tecnología dentro de las organizaciones:

- **Disminución de cuellos de botella:** se libra a la organización de las congestiones, retrasos y esperas largas para la gestión de productos, en otras palabras, este debe empezarse y terminarse.
- **Usabilidad efectiva de los espacios disponibles acorde a sus necesidades:** optimización de las áreas congestionadas de forma innecesaria, donde se alojan recursos materiales, equipo obsoleto, entre otros, lo cual muchas veces se encuentra en lugares importantes.
- **Reducción del trabajo administrativo:** se evita la excesiva cantidad de papel para elaboración de informes o reportes, dado que todo se logra automatizar con la ayuda de los sistemas de información integrados.
- **Mejora en el control y seguimiento:** se ajustan los tiempos de forma reducida, evitando la frecuencia de productos defectuosos.
- **Aumento de la satisfacción del personal:** se aumenta la seguridad en los procesos manejados, y se disminuye la frecuencia de accidentes laborales.

A partir de lo mencionado, se evidencia la manera en que la tecnología logra ayudar a optimizar los tiempos y los procesos, con los cuales se manejan los productos dentro de una planta. Como tal, es importante que todo sea planificado como se debe, siguiendo los estándares y protocolos que forman parte de cada organización. De todo ello depende la redistribución, puesto que, sin ello, tanto el personal que labora a nivel interno como externo, se vería sumamente afectado con un sinnúmero de inconvenientes.

2. Materiales y Métodos

Para llevar a cabo esta revisión bibliográfica se siguió un proceso metodológico riguroso y bien estructurado, que consistió en la búsqueda y análisis de diversos tipos de publicaciones relacionadas con la distribución de planta y la integración de tecnologías como realidad virtual, realidad aumentada, internet de las cosas e inteligencia artificial.

A partir de ello, se decidió trabajar mediante un gestor bibliográfico conocido como "**RefWorks**", el cual posee ventajas tales como la eficiencia por ser un creador de bases de datos y de fuentes para bibliografías de forma online, permitiendo que se puedan almacenar grandes cantidades de registros en el computador, siempre y cuando exista el acceso a internet.

Adicionalmente, algo beneficioso que tiene este gestor, es que permite la organización de los archivos a través de la creación de carpetas.

Dentro de la metodología empleada en el presente estudio se trabajó con un total de 4 fases, las cuales se detallan a continuación:

Tabla 1: *Descripción de las fases de la metodología de estudio*

Nº fase	Descripción
1	Búsqueda documental bibliográfica relacionada con el tema de estudio
2	Procedimientos aplicados para la búsqueda de información
3	Análisis de la información encontrada
4	Resultados

Nota: *La tabla muestra la descripción de la metodología de estudio. Información obtenida a partir de investigación de campo. Elaborado por autora.*

2.1. Fase 1: Búsqueda documental bibliográfica

En primer lugar, se realizó una búsqueda exhaustiva en diferentes bases de datos reconocidas, de las cuales se seleccionaron: Redalyc, Scielo, Science Direct y Google Académico, utilizando términos de búsqueda específicos para encontrar artículos, tesis, informes y publicaciones relevantes en la materia. Se limitó la selección de los artículos a aquellos publicados en los últimos años, con el fin de asegurar que se obtuviera información actualizada y relevante.

Para que la búsqueda resulte efectiva, se optó por hacer uso de un algoritmo de búsqueda, haciendo uso de palabras clave para repositorios y bases de datos, el cual abarcó los siguientes aspectos:

- **Primero:** se utiliza un término que designe una acción u objetivo de la investigación, que serían; "Integración" y "Distribución", puesto que se trata de la integración de la tecnología en la distribución de planta.
- **Segundo:** se procede a recurrir a un término conformado por una o dos palabras, considerando que estos sean lo más específicos posibles. En el caso de este trabajo se incluyen dos palabras; "Tecnología" y "Planta".
- **Tercero:** de forma opcional se puede hacer uso de un término que se enfoque en la población de estudio, es decir, a qué sujetos se dirige el estudio, en el caso de la presente investigación son: "Organizaciones" y "Fábricas industriales".
- **Cuarto:** se detalla el tipo de formato en el cual se desea que aparezcan los documentos, el mismo que fue escogido fue "filetype:PDF".

Como un dato importante, deberá colocarse un signo + y espacios después de cada palabra para separarlas, no puede ir todo unido, debido a que se alteran los resultados. El algoritmo final de esta búsqueda quedó de la siguiente manera:

```
Integración + tecnología + distribución + planta industrial + pdf
```

Una vez especificado el algoritmo de búsqueda, se procedió a la creación y organización de carpetas, donde serían colocados los archivos, para lo cual se tomó en consideración dividir las carpetas con base en las tecnologías, donde se ha aplicado la distribución de fábrica, de lo cual se seleccionaron un total de cuatro temas, organizados de la siguiente manera:

1. Integración de las tecnologías (1125)
2. Internet de las cosas (988)
3. Realidad virtual y aumentada (568)
4. Inteligencia artificial (744)

Dentro de estas carpetas se encontraron un total de 3,425 registros, los cuales se han filtrado a partir del año 2018 al año 2023 a fin de poder justificar la búsqueda realizada en los distintos repositorios. A continuación, se detalla una tabla con los elementos de búsqueda:

Tabla 2: *Esquema de la búsqueda de información*

CURSO	**2018 - 2022**	**Mayo 2023**
Actividad	**Selección** de términos empleados	Resultados finales
Actividad	**Selección y actualización** de publicaciones 2018 a diciembre de 2022 2018 a diciembre de 2022 2018 a diciembre de 2022	PUBLICACIÓN
Actividad	**Localización** o búsqueda sistemática de fuentes de bases de datos	
Fuentes de información	Redalyc, Scielo, Science Direct y Google Académico	
Actividad	Validación de manual de información Análisis de datos	

Nota: *La tabla muestra el esquema de búsqueda para la investigación. Información obtenida a partir de investigación de campo. Elaborado por autora.*

La selección de las bases de datos utilizadas permitió obtener una amplia variedad de artículos y publicaciones en la materia, lo que permitió abordar el tema desde diferentes perspectivas. Además, se emplearon términos de búsqueda específicos que permitieron obtener información relevante y actualizada.

2.2. Fase 2: Procedimientos aplicados para la búsqueda de información

En este proceso se utilizó un enfoque sistemático que permitió identificar y sintetizar los resultados obtenidos en cada uno de los artículos seleccionados. De esta manera, se logró proporcionar una visión general del estado actual de la integración de estas tecnologías en la distribución de planta.

a) Términos de búsqueda

Como tal, lo primero que se detalló fueron los términos de búsqueda a partir de palabras clave, puesto que permiten definir el contenido de los documentos, así como también su localización como archivo físico o digital. En este caso, en el primer apartado se emplearon los descriptores "Tecnología y Distribución de planta" en las bases de datos Scielo y Redalyc y en Google Académico. La búsqueda se efectuó mediante el campo TI (título) y, tal como se observa, entre los descriptores se aplicó el operador booleano Y (en español) AND (en inglés).

b) Límite temporal

Como un primer enfoque, dentro del periodo de 2018 a 2022 se estableció un límite de tiempo que va de 2017 hasta julio de 2022. Tal como se expresó con anterioridad, tomando en consideración el espacio que existe entre las mismas (3,425 registros), se ha optado por emplear un límite que se comprende entre 2019 a julio de 2022 y, a su vez, se obviaron los registros duplicados de forma manual, puesto que, al realizarlo de forma automática mediante el gestor bibliográfico, no se contó con una precisión adecuada.

c) Fuentes consultadas

Dentro del proceso de búsqueda de información se consultaron las siguientes fuentes:
Bases de datos genéricas: En este caso, para que no existiesen sesgos dentro de la búsqueda de datos bibliográficos, no se ha puesto ningún tipo de restricción a una única base de datos (BD), sino que se utilizaron un total de cuatro bases, las cuales han sido consideradas como recursos importantes para la búsqueda del tema de estudio, basado en la integración de la tecnología en la distribución de planta. En ese sentido, además de hacer una búsqueda de artículos, también se pudieron constatar otros recursos como papers, e-books, informes, patentes, entre otros.

De acuerdo con las bases de datos seleccionadas, se han dividido cada una de acuerdo con los temas de búsqueda, tal como se menciona a continuación:

- Redalyc (Internet de las cosas y Realidad virtual).
- Scielo (Integración de las tecnologías e Inteligencia artificial).
- Science Direct (Integración de las tecnologías).
- Google Académico (Integración de las tecnologías, internet de las cosas, realidad virtual y aumentada, inteligencia artificial).

d) Combinación de los resultados de búsqueda

En este punto se procedió a eliminar todos los registros que estuvieran duplicados, donde se seleccionó la referencia que fuera más relevante para cada caso. Por consiguiente, también se eliminaron aquellos artículos que no fueran de relevancia para el estudio, en otras palabras, los cuales no tuvieran relación con el tema. Se esclarece que, a pesar de haber hecho estas exclusiones, no hubo ningún tipo de discriminación por regiones ni países.

2.3. Fase 3: Análisis de la información encontrada

Una vez que se obtuvieron los artículos seleccionados, se procedió a su análisis y se identificaron los puntos clave de cada uno de ellos. Esta información se organizó de manera sistemática para sintetizar los resultados y obtener una comprensión clara de la integración de las tecnologías en la distribución de planta.

Dando seguimiento de forma cronológica, dentro de esta fase se pudieron identificar un total de tres fases:

- **Primera fase:** se centró en la revisión o búsqueda de forma sistemática en las distintas bases de datos (BD) mencionadas anteriormente.
- **Segunda fase:** se realizó la comprobación de forma manual de cada uno de los datos hallados, a fin de comprobar las referencias y eliminar sesgos.
- **Fase final:** se realizó el análisis de los datos que fueran de relevancia e interés para el estudio, recuento de los trabajos y redacción de estos.

La organización sistemática de la información obtenida permitió sintetizar los resultados de manera clara y concisa, lo que facilitó la comprensión del lector. Asimismo, el enfoque metodológico utilizado en esta revisión bibliográfica garantizó la rigurosidad y la calidad de la información obtenida.

Esta revisión bibliográfica utilizó un proceso metodológico exhaustivo y estructurado, que permitió identificar y analizar los puntos clave de diferentes artículos y publicaciones relacionados con la integración de tecnologías en la distribución de planta. El enfoque sistemático utilizado en la identificación y síntesis de los resultados permitió obtener una visión general del estado actual de la integración de estas tecnologías en la distribución de planta.

La selección de las bases de datos y los términos de búsqueda específicos utilizados garantizaron la obtención de información relevante y actualizada. En definitiva, esta revisión bibliográfica proporcionó una valiosa contribución al conocimiento en la materia y puede ser de gran utilidad para investigadores, estudiantes y profesionales, interesados en la distribución de planta y la integración de tecnologías en este ámbito.

3. Resultados y Discusión

3.1. Fase 4: Resultados

Con base en la experiencia investigativa, se han logrado obtener un total de 27 fuentes documentales. Dentro de la siguiente tabla se especifican cada una de las fuentes con sus respectivos autores y base de datos encontrada.

Tabla 3: *Base de datos, área, autores y año de las fuentes bibliográficas*

Base de datos	Área	Autores y año
1. Google Académico		[2](García Casas, 2020)
2. Redalyc		[10](Lenz et al., 2018)
3. Science Direct	Integración de tecnologías	[11](Ünsal et al., 2020)
4. Scielo		[12](Moussa & ElMaraghy, 2019)
5. Science Direct		[13](Monticolo et al., 2020)
6. Google Académico		[14](Microsoft, 2019)
7. Redalyc		[15](Fatima et al., 2022)
8. Google Académico		[2](García Casas, 2020)
9. Scielo		[16](Valencia, 2019)
10. Google Académico		[17](Raptis et al., 2019)
11. Science Direct	Internet de las cosas	[18](Javaid et al., 2021)
12. Google Académico		[19](Mora-Sánchez & Quito, 2020)
13. Google Académico		[20](Toro, 2017)
14. Science Direct		[21](Flores Zermeño, 2021)
15. Redalyc		[5](Maján & De La Fuente López, 2021)
16. Science Direct		[22](Fang et al., 2020)
17. Scielo		[23](Michalos et al., 2018)
18. Redalyc		[24](Peruzzini et al., 2021)
19. Google Académico	Realidad virtual	[25](Barba, 2018)
20. Science Direct	y aumentada	[26](Bellalouna, 2020)
21. Redalyc		[27](Hamwi & Lizarralde, 2017)
22. Science Direct		[28](Damiani et al., 2018)
23. Google Académico		[29](Nguyen et al., 2019)
24. Google Académico		[30](Bécue et al., 2021)
25. Google Académico	Inteligencia artificial	[31](Adeoye et al., 2023)
26. Redalyc		[32](Qiao et al., 2022)
27. Scielo		[33](Liu et al., 2022)

Nota: *La tabla muestra la base de datos, áreas, autor y año de las fuentes bibliográficas. Información obtenida a partir de investigación de campo. Elaborado por autora.*

La integración de la tecnología en la distribución de planta ha sido objeto de investigación y aplicación en diferentes sectores industriales. Los resultados de la incorporación de tecnología han sido positivos en términos de mejora de la eficiencia y la productividad, así como en la reducción de costos y tiempos de producción.

En la industria manufacturera, por ejemplo, la implementación de tecnología en la distribución de planta ha permitido una mejor organización de los procesos productivos, el uso de sistemas de control automatizados y la optimización del uso de recursos como el espacio, la energía y los materiales. La incorporación de tecnología en la distribución de planta también ha permitido una mayor flexibilidad en la producción, ya que los sistemas automatizados pueden adaptarse a diferentes necesidades de producción sin necesidad de cambiar la configuración física de la planta.

En el sector logístico, la integración de tecnología en la distribución de planta ha permitido una mejor gestión de los inventarios y una mayor eficiencia en la cadena de suministro. Los sistemas de seguimiento y monitoreo en tiempo real han permitido una mejor coordinación y planificación de las entregas, reduciendo los tiempos de espera y los costos asociados a la gestión de inventarios y la distribución de productos.

A pesar de los beneficios que la integración de tecnología en la distribución de planta puede aportar, su implementación requiere de una planificación cuidadosa y un conocimiento detallado de los procesos productivos y logísticos. La implementación de tecnología en la distribución de planta también puede requerir una inversión inicial significativa, lo que puede limitar su adopción en empresas más pequeñas o con recursos limitados.

En cuanto a la discusión, se puede señalar que la integración de tecnología en la distribución de planta puede tener efectos tanto positivos como negativos. Por un lado, la implementación de tecnología puede mejorar la eficiencia y la productividad, lo que puede tener un impacto positivo en la rentabilidad y competitividad de las empresas. Por otro lado, la implementación de tecnología también puede tener efectos negativos en términos de empleo, puesto que, los sistemas automatizados pueden sustituir ciertas tareas que antes eran realizadas por trabajadores.

La integración de tecnología en la distribución de planta puede ser una herramienta efectiva para mejorar la eficiencia y la productividad en diferentes sectores industriales. Sin embargo, su implementación debe ser cuidadosamente planificada y considerada en términos de los posibles efectos tanto positivos como negativos en los procesos productivos

y logísticos, así como en el empleo.

Después de selección de los artículos se ha obtenido las siguientes características en la implementación de las tecnologías:

Integración de tecnologías

La incorporación de tecnología en la distribución de planta ha revolucionado la forma en que las empresas diseñan y administran sus instalaciones, permitiéndoles ser más eficientes y competitivas en un mercado en constante cambio. Las tecnologías emergentes como el internet de las cosas, la realidad virtual y aumentada, y la inteligencia artificial están transformando la gestión de las operaciones y proporcionando una mayor seguridad en las operaciones, lo que mejora la salud y seguridad de los trabajadores.

La tecnología ha influido significativamente en la gestión y distribución de la planta, y ha demostrado ser una herramienta fundamental en la búsqueda de la excelencia operativa. La integración de estas tecnologías ha permitido a las empresas mejorar la productividad, reducir los costos y aumentar la calidad de los productos, lo que les ha dado una ventaja competitiva en el mercado.

Internet de las Cosas

Otra tecnología que está transformando la gestión de la planta es el internet de las cosas (IoT). El IoT permite la interconexión de los dispositivos y maquinarias de la planta, lo que permite una mejor coordinación y planificación de la producción, además, el IoT también puede ser utilizado para la recopilación de datos en tiempo real, lo que permite una mejor supervisión y control del proceso de producción.

Realidad Virtual y Aumentada

La realidad virtual y aumentada también están teniendo un impacto significativo en la gestión de la planta. Estas tecnologías permiten a los empleados entrenar y simular situaciones de trabajo en un entorno virtual seguro. También pueden ser utilizadas para la planificación y el diseño de la planta, lo que permite a los gerentes visualizar y experimentar con diferentes configuraciones antes de implementarlas en la planta real.

Inteligencia Artificial

La Inteligencia Artificial (IA), en particular, ha tenido un gran impacto en la gestión empresarial. La IA puede analizar grandes cantidades de datos en tiempo real y proporcionar información valiosa para la toma de decisiones. Los sistemas de IA también pueden ser utilizados para el mantenimiento predictivo, lo que significa que las empresas pueden anticiparse a posibles problemas antes de que ocurran.

4. Conclusiones

Una vez concluido el análisis bibliográfico presentado, se puede concluir con base al objetivo de estudio que, la integración de las tecnologías en la distribución de planta realmente juega un papel significativo dentro del presente trabajo, puesto que, según lo revisado, esto contribuye de forma eficiente a que las plantas de fabricación tomen medidas mucho más asertivas para el manejo de sus procesos internos y externos, así como también, opten por emplear soluciones ágiles con respuestas integrales.

Algo que se pudo resaltar en esta revisión, es que la razón por la cual las empresas tienen que realizar lo que se conoce como redistribución de fábrica, se debe a la falta de organización que existe entre los miembros de la entidad, es decir, no existe una comunicación efectiva ni reuniones en las cuales se pueda llevar un acuerdo acerca de los cambios que se desea realizar.

En ese aspecto, el problema también se remonta sobre la falta de adaptabilidad de parte de los funcionarios respecto a los sistemas automatizados de procesos, puesto que han estado acostumbrados a trabajar bajo una metodología monótona y poco convencional.

Por otra parte, a pesar de las desventajas de este tipo de cambios, lo cierto es que, se logra aportar con mejor eficiencia y calidad a los procesos de producción, la incorporación de estas la tecnología también ha ayudado a que se mejore la seguridad en la planta.

Los sistemas de IA pueden ser utilizados para detectar posibles problemas de seguridad, mientras que el IoT puede ser utilizado para monitorear los riesgos ambientales y garantizar que las regulaciones de seguridad se cumplan.

La realidad virtual y aumentada también pueden ser utilizadas para simular situaciones de peligro y entrenar a los trabajadores para reaccionar adecuadamente.

Sin embargo, a pesar de los beneficios de estas tecnologías, todavía existen algunos desafíos que deben abordarse. La implementación de estas tecnologías puede ser costosa y requiere una inversión significativa en recursos humanos y tecnológicos. Además, la capacitación de los trabajadores en el uso de estas tecnologías puede ser un proceso largo y complejo.

Otro desafío es la seguridad de la información. La interconexión de dispositivos y maquinarias en la planta puede aumentar el riesgo de ataques cibernéticos, lo que puede poner en riesgo la seguridad de los datos y la producción. Por lo tanto, es importante implementar medidas de seguridad adecuadas para proteger la información.

Referencias

[1] E. Espíndola y J. I. Suárez, «Automatización laboral y estratificación en América Latina», CEPAL, Documento de proyecto e investigación, 2023, Accedido en 2026. dirección: https://repositorio.cepal.org/entities/publication/0e6d5109-2399-46d0-a9b8-ac83668b0f21

[2] García Casas, J. D. (2020). Proyecto de automatización para línea de terminado de empresa productora de retenedores de aceite usando sistemas IoT. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78032.

[3] P. A. Aguaysa Carrillo, «Distribución de planta y su influencia en el proceso de producción del área de manufactura en la empresa Tenería "Inca" S.A de la ciudad de Ambato», Repositorio institucional UTA, Tesis de Grado, Universidad Técnica de Ambato, 2013. dirección: http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/5819

[4] J. A. Veloz Pereda, M. H. Vásquez Coronado y M. A. Arrascue Becerra, «Mejora de Distribución de Planta para Incrementar la Productividad en la Empresa Timones Hidráulicos Veloz de la Ciudad de Trujillo», *Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, vol. 7, n.º 2, págs. 136-150, 2020. DOI: 10.26495/icti.v7i2.1494 dirección: https://revistas.uss.edu.pe/index.php/ING/article/view/1494

[5] Maján, G., & De La Fuente López, E. (2021). IoT for small factories needs. https://uvadoc.uva.es/handle/10324/47051.

[6] M. Saturno, V. Moura Pertel, F. Deschamps y E. de Freitas Rocha Loures, «Proposal of an automation solutions architecture for Industry 4.0», en *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*, mar. de 2017. DOI: 10.12783/dtetr/icpr2017/17675 dirección: https://doi.org/10.12783/dtetr/icpr2017/17675

[7] K. Schwab, *La cuarta revolución industrial*. World Economic Forum, 2019.

[8] J. P. Parra Flores y K. S. Sarmiento Barahona, «Diseño de la automatización de un secador de granos de cacao de la empresa "Proyecto de secado de cacao y maíz Carlos Jara y familia" para mejorar la eficiencia y seguridad en la obtención del grano seco», Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2022.

[9] Universidad de Oviedo, *Material adaptado de arquitectura de automatización para Industria 4.0*, Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo, Adaptado para figura / esquema en el presente artículo, 2022. dirección: https://www.uniovi.es/

[10] Lenz, J., Wuest, T., & Westkämper, E. (2018). Holistic approach to machine tool data analytics. Journal of Manufacturing Systems, 48, 180–191. https://doi.org/10.1016/J.JMSY.2018.03.003.

[11] Ünsal, I., Hirtler, M., Sviridov, A., & Bambach, M. (2020). Material Properties of Features Produced from EN AW 6016 by Wire-Arc Additive Manufacturing. Procedia Manufacturing, 47, 1129–1133. https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2020.04.131.

[12] Moussa, M., & ElMaraghy, H. (2019). Master assembly network for alternative assembly sequences. Journal of Manufacturing Systems, 51, 17–28. https://doi.org/10.1016/J.JMSY.2019.02.001.

[13] Monticolo, D., Lahoud, I., & Barrios, P. C. (2020). OCEAN: A multi agent system dedicated to knowledge management. Journal of Industrial Information Integration, 17, 100124. https://doi.org/10.1016/J.JII.2019.100124.

[14] Microsoft. (2019). Manufacturing Trends Report. https://info.microsoft.com/rs/157-GQE-382/images/EN-US-CNTNT-Report-2019-Manufacturing-Trends.pdf.

[15] Fatima, Z., Tanveer, M. H., Waseemullah, Zardari, S., Naz, L. F., Khadim, H., Ahmed, N., & Tahir, M. (2022). Production Plant and Warehouse Automation with IoT and Industry 5.0. Applied Sciences 2022, Vol. 12, Page 2053, 12(4), 2053. https://doi.org/10.3390/APP12042053.

[16] Valencia, A., & P. P. (2019). Internet Industrial de las Cosas (IIOT): Nueva Forma de Fabricación Inteligente · Repositorio FUP. http://unividafup.edu.co/repositorio/items/show/693.

[17] Raptis, T. P., Passarella, A., & Conti, M. (2019). Data management in industry 4.0: State of the art and open challenges. IEEE Access, 7, 97052–97093. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2929296.

[18] Javaid, M., Abid Haleem, Pratap Singh, R., Rab, S., & Suman, R. (2021). Upgrading the manufacturing sector via applications of Industrial Internet of Things (IIoT). Sensors International, 2, 100129. https://doi.org/10.1016/J.SINTL.2021.100129.

[19] Mora-Sánchez, D., & Quito, U. U. (2020). Industria 4.0: el reto en la ruta hacia las organizaciones digitales. Estudios de La Gestión: Revista Internacional de Administración, 8, 186–209. https://doi.org/10.32719/25506641.2020.8.7.

[20] Toro, A., S. G., & S. M. (2017). IIoT y sistemas de control: oportunidades, desafíos y arquitecturas. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507555085001.

[21] Flores Zermeño, F. J., & C. F. E. G. (2021). Aplicaciones, enfoques y tendencias del Internet de las Cosas (IoT): revisión sistemática de la literatura. https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1020/543.

[22] Fang, P., Yang, J., Zheng, L., Zhong, R. Y., & Jiang, Y. (2020). Data analytics-enable production visibility for Cyber-Physical Production Systems. Journal of Manufacturing Systems, 57, 242–253. https://doi.org/10.1016/J.JMSY.2020.09.002.

[23] Michalos, G., Karvouniari, A., Dimitropoulos, N., Togias, T., & Makris, S. (2018). Workplace analysis and design using virtual reality techniques. CIRP Annals, 67(1), 141–144. https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2018.04.120.

[24] Peruzzini, M., Grandi, F., Cavallaro, S., & Pellicciari, M. (2021). Using virtual manufacturing to design human-centric factories: an industrial case. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 115(3), 873–887. https://doi.org/10.1007/S00170-020-06229-2/METRICS.

[25] Barba, M. (2018). Realidad aumentada aplicada al sector industrial. https://blogthinkbig.com/realidad-aumentada-aplicada-al-sector-industrial.

[26] Bellalouna, F. (2020). New Approach for Digital Factory Using Virtual Reality Technology. Procedia CIRP, 93, 256–261. https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2020.04.012.

[27] Hamwi, M., & Lizarralde, I. (2017). A Review of Business Models towards Service-Oriented Electricity Systems. Procedia CIRP, 64, 109–114. https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2017.03.032.

[28] Damiani, L., Demartini, M., Guizzi, G., Revetria, R., & Tonelli, F. (2018). Augmented and virtual reality applications in industrial systems: A qualitative review towards the industry 4.0 era. IFAC-PapersOnLine, 51(11), 624–630. https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2018.08.388.

[29] Nguyen, H. D., Tran, K. P., Zeng, X., Koehl, L., Castagliola, P., & Bruniaux, P. (2019). Industrial Internet of Things, Big Data, and Artificial Intelligence in the Smart Factory: a survey and perspective. 72–76. https://hal.science/hal-02268119.

[30] Bécue, A., Praça, I., & Gama, J. (2021). Artificial intelligence, cyber-threats and Industry 4.0: challenges and opportunities. Artificial Intelligence Review, 54(5), 3849–3886. https://doi.org/10.1007/S10462-020-09942-2/METRICS.

[31] Adeoye, J., Hui, L., & Su, Y. X. (2023). Data-centric artificial intelligence in oncology: a systematic review assessing data quality in machine learning models for head and neck cancer. Journal of Big Data, 10(1).

[32] Qiao, Y., Gou, G., Shuai, H., Han, F., Liu, H., Tang, H., Li, X., Jian, J., Wei, Y., Li, Y., Xie, C., He, X., Liu, Z., Song, R., Zhou, B., Tian, H., Yang, Y., Ren, T. L., & Zhou, J. (2022). Electromyogram-strain synergetic intelligent artificial throat. Chemical Engineering Journal, 449, 137741. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2022.137741.

[33] Liu, Z., Sun, Y., Xing, C., Liu, J., He, Y., Zhou, Y., & Zhang, G. (2022). Artificial intelligence powered large-scale renewable integrations in multi-energy systems for carbon neutrality transition: Challenges and future perspectives. Energy and AI, 10, 100195. https://doi.org/10.1016/J.EGYAI.2022.100195.

IDEAS

Innovation & Development in Engineering and Applied Science

Journal homepage: https://revistasojs.utn.edu.ec/index.php/ideas

Desempeño de redes SD-WAN vs. MPLS: Evaluación en diferentes escenarios

Performance of SD-WAN vs. MPLS Networks: Evaluation in Different Scenarios

Santiago Meneses Narvaez[a], Emilio Zhuma Mera[a], Ángel Torres Quijije[a], Marco Chimbo Fogacho[a]

[a] Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador

Enviado: 03/04/2025, Recibido: 29/08/2025, Publicado: 30/01/2026
Autor de correspondencia:
Santiago Meneses Narvaez: smenesesn@uteq.edu.ec
DOI: 10.53358/ideas.v8i1.1238

PALABRAS CLAVE

Redes,
análisis,
MPLS,
SD-WAN,
métrica,
GNS3,
calidad de servicio.

RESUMEN

Las redes definidas por software (SDN) han llegado para flexibilizar y agilizar los entornos de red, permitiendo la administración mediante la separación del plano de control y el plano de reenvío, teniendo la capacidad de adaptar una red rápidamente a entornos cambiantes. Por su parte, las redes de Conmutación Multiprotocolo por Etiqueta (MPLS) gestionan el tráfico mediante un mecanismo de conmutación de etiquetas, lo que les confiere ventajas clave en entornos empresariales. Esta investigación analiza comparativamente el rendimiento de las redes de área amplia definidas por software (SD-WAN) y las redes de Conmutación Multiprotocolo por Etiqueta (MPLS) centrándose en evaluar parámetros críticos como latencia, variación de retardo (jitter), ancho de banda y pérdida de paquetes. Para el análisis se ha planteado diferentes escenarios de simulación, a los cuales se les ha generado una carga controlada de tráfico, los resultados de cada carga generada se envian a una base de datos, a su vez esta base de datos conecta con grafana, que permite la fácil visualización de datos mediante gráficos.

KEYWORDS

Networks,
analysis,
quality of service,
MPLS,
SD-WAN,
metrics,
GNS3.

ABSTRACT

Software-Defined Networks (SDN) have emerged to enhance flexibility and agility in network environments by enabling management through the separation of the control plane and the forwarding plane. This separation allows networks to quickly adapt to changing environments. Meanwhile, Multiprotocol Label Switching (MPLS) networks manage traffic using a label-switching mechanism, providing key advantages in enterprise environments. This research comparatively analyzes the performance of Software-Defined Wide Area Networks (SD-WAN) and Multiprotocol Label Switching (MPLS) networks, focusing on critical parameters such as latency, jitter, bandwidth, and packet loss. For the analysis, different simulation scenarios have been designed, each subjected to a controlled traffic load. The results of each generated load are sent to a database, which is then connected to Grafana, allowing for easy data visualization through graphs.

1. Introducción

La innovación en servicios digitales, así como la facilidad de acceso a ellos, ha permitido una generación exponencial de datos e información provocando sobrecarga en las redes [1]. En la actualidad, existe una gran variedad de aplicaciones, las cuales requieren una gran cantidad de recursos en equipos de red al generar simultáneamente mucho tráfico, por lo que el ancho de banda debe utilizarse de forma eficiente [2].

En las últimas décadas se ha visto un incremento significativo en servicios de tiempo real, por lo que los proveedores de servicios de internet han tenido que tomar medidas para brindar un servicio confiable y de calidad. Se han realizado una serie de investigaciones para el desarrollo de diferentes mecanismos y técnicas que permitan el uso eficiente de los elementos de red, minimizando la pérdida y retraso de paquetes [3]. MPLS (Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo) ha sido la solución de muchas interrogantes, ya que es una tecnología que ofrece la posibilidad de transferencia de información a altas velocidades [2], por lo que la actual solución integrada de enrutamiento IP/conmutación es una de las mejores aplicaciones de la tecnología MPLS [4].

En MPLS, las sucursales zonales se conectan a los centros de datos mediante enrutadores. El tráfico de origen a destino se envía y recibe mediante métodos de direccionamiento TCP/IP [5]. Esta arquitectura es ideal para redireccionar el tráfico desde y hacia los centros de datos a las sucursales zonales. Con la evolución de la computación en la nube, el patrón de tráfico cambió por completo y el modelo MPLS no era compatible con el nuevo patrón de tráfico basado en aplicaciones en la nube [2].

Los métodos de enrutamiento convencionales presentan numerosos desafíos prácticos. La arquitectura SD-WAN disocia la gestión y el control de la red del hardware físico, lo que permite un plano de control centralizado basado en software [6], dando como resultado una arquitectura con tres componentes clave como el SD-WAN Edge, SD-WAN Controller, y SD-WAN Orchestrator como se ve en la Fig. 1.

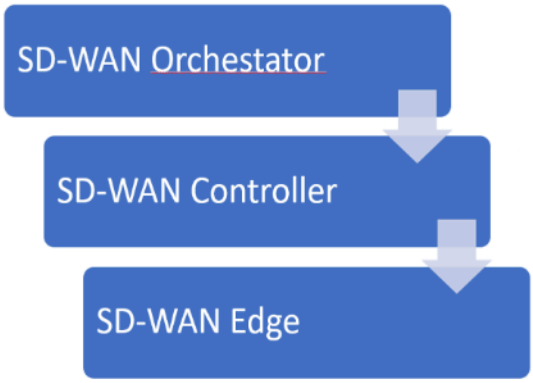


Figure 1: Arquitectura SD-WAN.

Esta red virtualizada opera como una capa adicional sobre hardware de bajo costo, mientras que controladores centralizados gestionan el plano de control. Su infraestructura IP virtual segura permite la segmentación del tráfico, el enrutamiento y la difusión de rutas. Además, incorpora autenticación y cifrado para garantizar la seguridad de los datos del usuario [7, 8]. La combinación del plano de control, el plano de datos y la estructura IP virtual proporciona una red robusta, segura y escalable [9, 10].
SD-WAN se aplica ampliamente para la interconexión de redes en varios escenarios, ISP, interconexión de centros de datos, soluciones en la nube e internet de las cosas [11]. En comparación con WAN tradicionales, SDWAN es superior y más económico, teniendo una implementación, administración y mantenimiento más ágil [11, 12].

Este trabajo está estructurado en cuatro secciones. En la segunda sección, se describen las herramientas y redes utilizadas en la simulación, junto con el análisis correspondiente a cada elección. En la Fig. 2 se destaca la secuencia del flujo de información y el desarrollo de la implementación: una vez que las topologías estén operativas, se utilizará Python para generar una carga de tráfico en las redes. Los resultados obtenidos se almacenarán en una base de datos que es influx-db, la cual estará vinculada a una herramienta que facilitará su visualización de manera sencilla como lo es grafana.

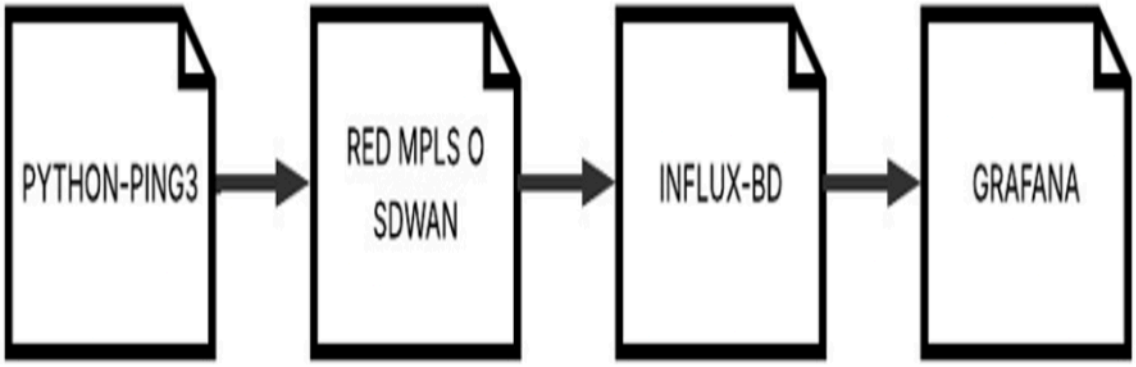


Figure 2: Flujo de datos en la simulación.

En la sección tres se analizan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas para cada topología de red, con el respaldo de los gráficos generados en grafana, y por último en la etapa final que corresponde a la cuarta sección, se tiene la sección de bibliografía que respalda el desarrollo de este trabajo.

2. Metodología

2.1. Metodología de investigación

El presente trabajo utiliza el método inductivo que se basa en la observación y experimentación, construyendo una comprensión sólida de los conceptos involucrados, también se usa el método analítico para entender las diferentes métricas de rendimiento, y el método experimental, donde con el uso de diferentes herramientas se establecieron las configuraciones necesarias en los ambientes de simulación.

2.2. Herramientas

Emuladores. Se realizó un análisis detallado de diferente software para simulación y emulación de redes de datos, teniendo como principales opciones cisco packet tracer, el cual es un simulador; tenemos gns3, eve-ng y mininet, que son emuladores, entendiéndose que un emulador lo que hace es ejecutar una copia exacta de un Sistema operativo real, permitiendo tener resultados cercanos a entornos de implementación, como se ve en la Tabla 1.

Table 1: Comparación de software para simulación y emulación.

Características	**Cisco Packet Tracert**	**GNS3**	**EVE-NG**	**Mininet**
Simulador	Si	Si	Si	Si
Emulador	No	Si	Si	No
Open Source	No	Si	Si	Si
Interfaz de usuario (GUI)	Si	Si	Si	No
Multiplataforma	No	Si	Si	Si
Programabilidad	No	Si	Si	Si
Controladores admitidos	No	Si	Si	Si
Herramientas de trafico	No	Si	Si	Si
Escalabilidad	No	Si	Si	Si
Compatibilidad con Dynamips	No	Si	Si	No
Complejidad	Bajo	Media	Alto	Alto
Programabilidad	No	Si	Si	Si
Documentación	Si	Si	Si	Si
Requiere Máquina Virtual	No	Si	Si	No
Memoria RAM	4 Gb	4 Gb	4 Gb	2 Gb

GNS3 es un software (Graphical Network Simulator-3), un simulador que permite diseñar, construir y emular redes de datos, tiene su notabilidad ya que es una herramienta de software libre, que permite la integración de diferentes marcas de fabricantes, como Cisco, Mikrotik, Fortinet, entre otros [13].

Controladores SD-WAN. Los controladores SD-WAN son elementos que permiten el control, administración y gestión de políticas y servicios. En la Tabla 2 se muestra el resultado de la revisión y aspectos clave en cuanto a estos controladores [14].

Table 2: Controladores SD-WAN

Características	**Cisco vManage**	**Cisco Meraki**	**VMware Velocloud SD-WAN**	**Juniper Contrail SD-WAN**	**Fortimanager**
Proveedor	Cisco	Cisco	VMware	Juniper Networks	Fortinet
Interfaz de usuario	Web	Web	Web	Web, CLI	Web, CLI
Api	Restful	Restful	Restful	Restful	Restful
Lenguaje	Js, Python	Js	Js, Python	Java, Python	C++, Python
Multiplataforma	Si	Si	Si	Si	Si
Seguridad	Si	Si	Si	Si	Si
Análisis y reporte	Si	Si	Si	Si	Si
Consumo de recursos	Alto	Bajo	Medio	Alto	Medio
Componentes Adicional	Cisco Vbond, Vedge, Vsmart	No	Orchestrator, Gateway	Gateway, Orchestrator	Fortigate, Fortianalizer
Dificultad de configuración	Alto	Bajo	Medio	Medio	Medio
Virtualización	Si	No	Si	Si	Si

Fortimanager con el Sistema operative FortiOs, es la herramienta que permite la administración de forma centralizada de productos Fortinet, siendo una elección idónea por su documentación detallada y la capacidad de operar sin la necesidad del controlador Fortimanager.

MPLS: Existen varios fabricantes de equipos que trabajan con el protocolo MPLS, además de ello permiten la simulación de sus sistemas operativos con software como GNS3. A continuación, se detalla en Tabla 3 algunos fabricantes que trabajan con MPLS.

Table 3: Fabricantes de equipos con MPLS.

Características	**Cisco IOS XR**	**Juniper Junos**	**Mikrotik RouterOs**	**Huawei (VRP)**
Proveedor	Cisco	Juniper	Mikrotik	Huawei
GUI	Si	Si	Si	Si
Multiplataforma	Si	Si	Si	Si
Escalabilidad	Alta	Alta	Alta	Alta
Soporte de scripts	Python	Python	Python, Winbox scripts	Python, Shell
Documentación	Extensa, profesional	Detallada y estructurada	Amplia y fácil de entender	Amplia y detallada
Facilidad de uso	Alta y requiere conocimiento especializado	Alta y familiaridad con Junos	Alta e intuitiva con Winbox	Alta y requiere conocimiento Huawei
Memoria	16GB	512MB	352MB	2Gb
Componentes adicionales	Si	No	No	No
Virtualización	Si	Si	Si	Si

Mikrotik RouterOS permite la fácil integración con simuladores como GNS3, además su fácil integración con la herramienta Winbox, que permite la configuración de manera gráfica, haciendo de esto una solución llamativa para el presente trabajo.

Bases de datos: La base de datos es un punto muy central en el presente trabajo, para lo cual se consideraron algunas soluciones para este tema, teniendo a influxDB como la solución más apropiada, por ser una base de serie temporal con capacidad de gestionar y almacenar datos de alta frecuencia de manera eficiente, como son las métricas de monitoreo obtenidas. Se presenta en la Tabla 4 una comparativa relacionada con bases de datos.

Table 4: Base de datos.

Características	**Relacional**	**No relacional**	**Serie Temporal**
Modelos de datos	Ordenados por filas, columnas y tablas	Clave-valor, documentos	Datos ordenados por tiempo
Esquema	Estructura rígida y predefinida	Flexible y dinámico	Optimizado para datos temporales
Lenguaje de consulta	SQL (Structured Query Languaje)	Diferentes lenguajes de consulta	SQL para serie temporal o lenguajes específicos de consulta (InfluxDB)
Escalabilidad	Escalabilidad vertical	Escalabilidad vertical	Escalabilidad horizontal y optimizada
Transacciones	Soporte completo (ACID)	Varia en el uso de transacciones	Optimizado para inserciones rápidas
Usos Típicos	Aplicaciones empresariales, sistemas de gestión de datos	Aplicaciones web, grandes volúmenes de datos no estructurados o semiestructurados	Análisis de series temporales, IOT, finanzas, ciencia de datos
Ejemplos de SGBD	MySQL, Oracle, PostgreSQL	MongoDB, Casandra, Redis	InfluxDB, Prometheus, TimeScaleDB

Visualización de datos: En el análisis de una herramienta completa para el monitoreo y visualización de la red SD-WAN y MPLS, se identificaron algunas opciones como las que se observan en la Tabla 5, donde se determina que Grafana proporciona una visualización de grandes cantidades de datos, esto sumado a la integración con diversas herramientas como InfluxDB y Python, lo hacen ideal para el propósito de este trabajo.

Table 5: Software de monitoreo

Características	**Zabbix**	**Grafana**	**Nagios**
Función principal	Monitoreo y recolección de datos de redes, servidores y aplicaciones	Visualización y análisis de datos de monitoreo	Monitoreo y recolección de datos de sistemas, redes y aplicaciones
Tipo de software	Server y agente	Servidor	Servidor
Interfaz de usuario	Web y CLI	Web	Web
Escalabilidad	Si	Si	Si
Protocolo de comunicación	SNMP, IPMI, JMX, SMTP	HTTP y API	SNMP, HTTP, SMTP, FTP
Integración con otras herramientas	Si	Si	Si
Multiplataforma	Si	Si	Si
Documentación	Si	Si	Si
Memoria RAM	8Gb	4 Gb	1 Gb

2.3. Diseño de escenarios

Se plantearon tres escenarios de prueba en el presente trabajo, en cada escenario se implementó MPLS con SD-WAN, las herramientas usadas para la simulación fueron descritas en las tablas anteriores, la implementación fue configurada bajo parámetros específicos y así poder evaluar el comportamiento de las redes bajo una carga de tráfico determinada.

Para los diferentes escenarios de la red MPLS los equipos etiquetados con “LSR” y “LER” son enrutadores y la etiqueta “TSBD” es la base de datos de serie temporal. Por otro lado, para los escenarios SD-WAN, la etiqueta “Zona” y “Central” hace referencia a enrutadores y finalmente en la red mixta SD-WAN y MPLS, el equipo “ESW” es un switch Ethernet de capa 3 para interconectar segmentos de red.

Topología Estrella MPLS: La presente topología consta de 5 enrutadores, 4 switch, 2 navegadores y 1vpc, adicional 1 máquina virtual con Linux para la carga de tráfico; cada enrutador tiene MPLS funcionando, también está presente la base de datos con grafana. En las Figuras 3 y 4 se muestra la topología y un fragmento de las configuraciones realizadas.

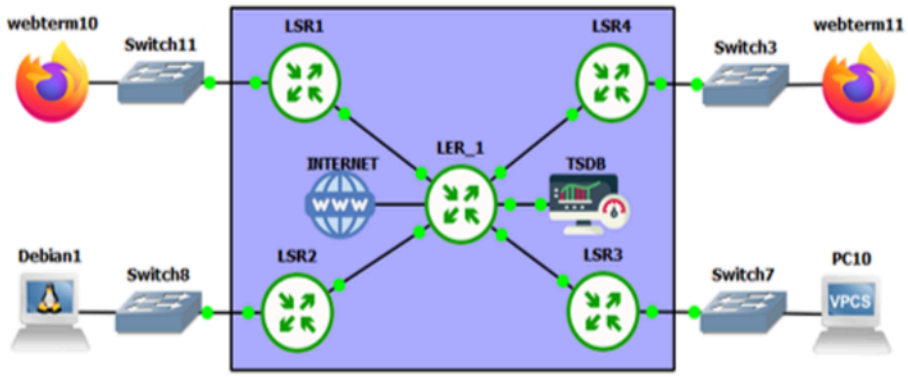


Figure 3: Topología MPLS en estrella

```
[admin@LSR2] > ip ad print
Flags: X - disabled, I - invalid, D - dynamic
 #   ADDRESS            NETWORK         INTERFACE
 0   192.168.10.12/24   192.168.10.0    Admin_ether2
 1   20.3.3.3/32        20.3.3.3        Loopback2
 2   170.168.20.2/24    170.168.20.0    LER_ether5
 3   190.168.20.1/24    190.168.20.0    LAN_ether9
[admin@LSR2] >
[admin@LSR2] > mpls interface print
Flags: X - disabled, * - default
 #    INTERFACE                                                  MPLS-MTU
 0  * all                                                            1508
 1    ether1                                                         1508
 2    LER_ether5                                                     1508
 3    Loopback2                                                      1508
[admin@LSR2] > mpls ldp print
                    enabled: yes
                     lsr-id: 20.3.3.3
          transport-address: 20.3.3.3
          path-vector-limit: 255
                   hop-limit: 255
                loop-detect: yes
          use-explicit-null: no
 distribute-for-default-route: no
[admin@LSR2] > mpls ldp neighbor print
Flags: X - disabled, D - dynamic, O - operational, T - sending-targeted-hello,
V - vpls
 #      TRANSPORT       LOCAL-TRANSPORT PEER                    SEN
 0 DO   20.1.1.1        20.3.3.3        20.1.1.1:0              no
```

Figure 4: Interfaces agregadas al protocolo MPLS y LDP del nodo LSR2

Topología malla MPLS. Este escenario cuenta con cinco enrutadores, 4 switch, un navegador tipo webterm, 3vpc, y una máquina virtual Linux, la variante de la topología anterior es el número de conexiones de cada router como se ve en las Figuras 5 y 6.

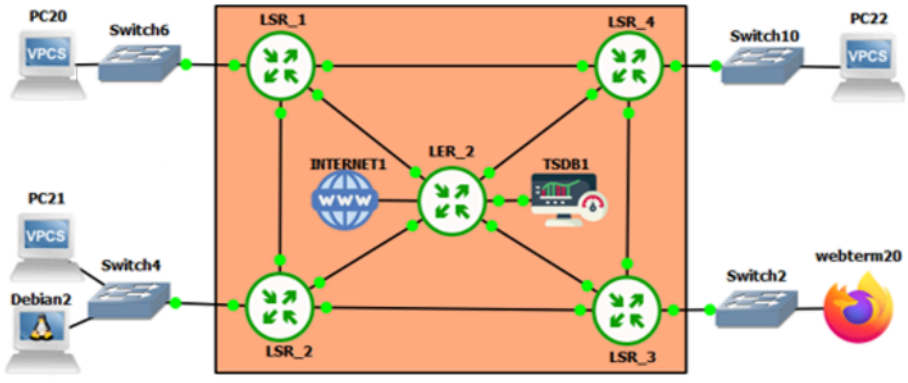
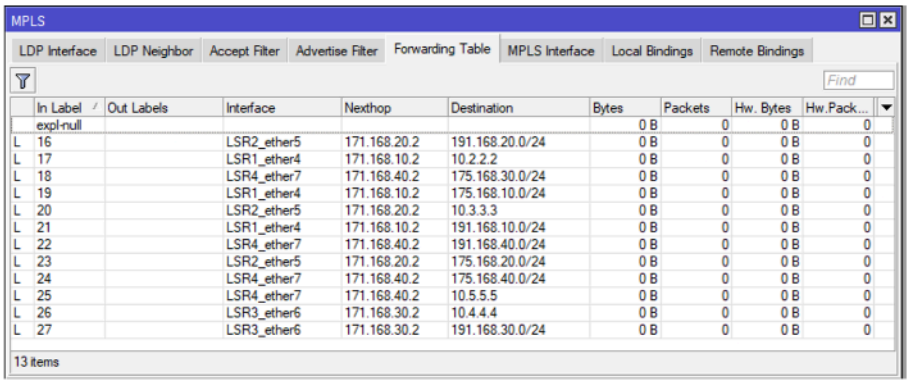


Figure 5: Topología MPLS en malla



	In Label	Out Labels	Interface	Nexthop	Destination	Bytes	Packets	Hw. Bytes	Hw.Pack...
	expl-null					0 B	0	0 B	0
L	16		LSR2_ether5	171.168.20.2	191.168.20.0/24	0 B	0	0 B	0
L	17		LSR1_ether4	171.168.10.2	10.2.2.2	0 B	0	0 B	0
L	18		LSR4_ether7	171.168.40.2	175.168.30.0/24	0 B	0	0 B	0
L	19		LSR1_ether4	171.168.10.2	175.168.10.0/24	0 B	0	0 B	0
L	20		LSR2_ether5	171.168.20.2	10.3.3.3	0 B	0	0 B	0
L	21		LSR1_ether4	171.168.10.2	191.168.10.0/24	0 B	0	0 B	0
L	22		LSR4_ether7	171.168.40.2	191.168.40.0/24	0 B	0	0 B	0
L	23		LSR2_ether5	171.168.20.2	175.168.20.0/24	0 B	0	0 B	0
L	24		LSR4_ether7	171.168.40.2	175.168.40.0/24	0 B	0	0 B	0
L	25		LSR4_ether7	171.168.40.2	10.5.5.5	0 B	0	0 B	0
L	26		LSR3_ether6	171.168.30.2	10.4.4.4	0 B	0	0 B	0
L	27		LSR3_ether6	171.168.30.2	191.168.30.0/24	0 B	0	0 B	0

Figure 6: Estado de tabla de reenvío del protocolo MPLS en la topología malla

Topología Estrella Red SDWAN: Esta topología consta de 5 enrutadores, 4 switch, 1 navegador web, 2vpc, la base de datos y una máquina virtual Linux. La Figura 7 se muestra el diagrama de la topología, mientras que la Figura 8, las configuraciones realizadas.

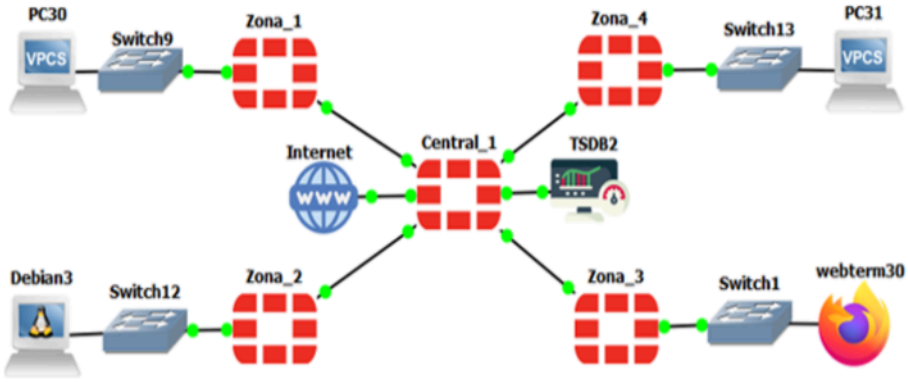


Figure 7: Topología SDWAN estrella

Name	Source	Destination	Schedule	Service	Action	NAT	Security Profiles	Log	Bytes
Zona1 (port4) → SD_Fortinet 1									
Salida_Zona1	all	all	always	ALL	✓ ACCEPT	Enabled	no-inspection	UTM	81.62 kB
Zona2 (port5) → SD_Fortinet 1									
Salida_Zona2	all	all	always	ALL	✓ ACCEPT	Enabled	no-inspection	UTM	362.43 kB
Zona3 (port6) → SD_Fortinet 1									
Salida_Zona3	all	all	always	ALL	✓ ACCEPT	Enabled	no-inspection	UTM	55.67 kB
Zona4 (port7) → SD_Fortinet 1									
Salida_zona4	all	all	always	ALL	✓ ACCEPT	Enabled	no-inspection	UTM	0 B

Figure 8: Configuración de firewall policy en SD-WAN estrella

Topología malla red SDWAN: Esta topología consta de 5 enrutadores, 4 switch, 3vpc, 1 navegador web, una máquina Linux; la diferencia con la topología anterior, son las conexiones por cada router. La Figura 9 muestra el diagrama de la topología, mientras que la Figura 10, las configuraciones realizadas.

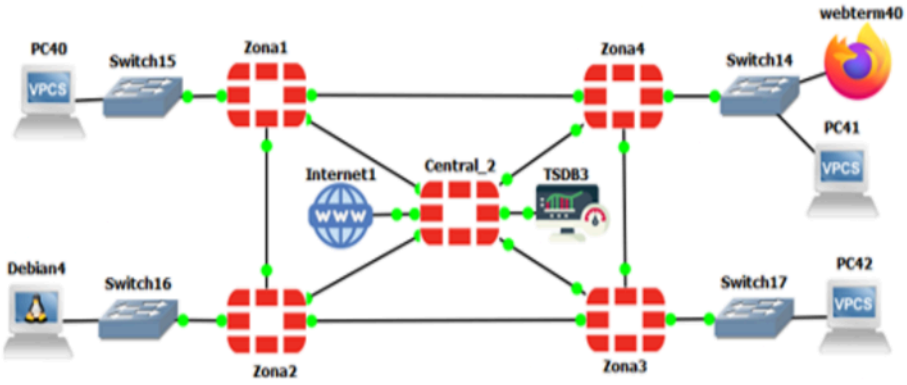


Figure 9: Topología SDWAN malla

Name	Details	Interface
IP Range/Subnet 7		
FABRIC_DEVICE	0.0.0.0/0	
FIREWALL_AUTH_PORTAL_ADDRESS	0.0.0.0/0	
LAN	194.168.20.0/24	LAN (port9)
RedundncyZona1	181.168.10.0/24	RedundancyZona1
SSLVPN_TUNNEL_ADDR1	10.212.134.200 - 10.212.134.210	SSL-VPN tunnel interface (ssl.root)
all	0.0.0.0/0	
none	0.0.0.0/32	
Interface Subnet 2		
RedundancyZona1 address	181.168.10.0/24	RedundancyZona1
RedundancyZona3 address	181.168.20.0/24	RedundancyZona3

Figure 10: Configuración de address en la zona 2 para la red SD-WAN malla

Escenario mixto con SDWAN Y MPLS: Se planteó el diseño de una topología mixta que combine SDWAN Y MPLS, teniendo un enfoque híbrido, donde el equipo "ESW" es un switch Ethernet de capa 3 para interconectar segmentos de red, además el enlace entre LER_3 y CENTRAL_3 es activo, tal como se muestra en la Figura 11.

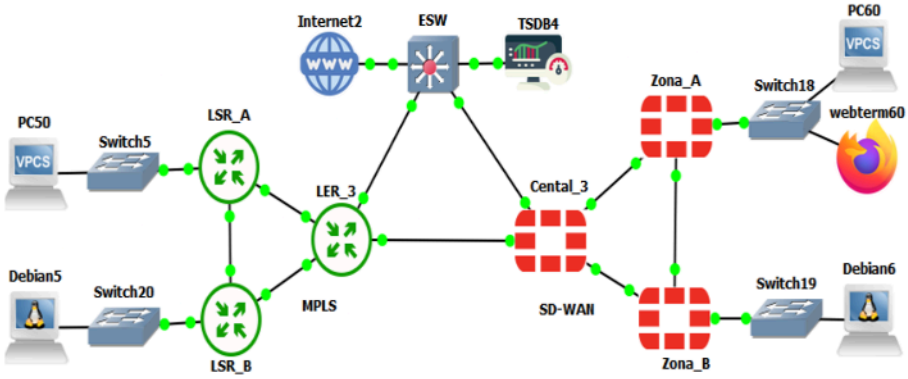


Figure 11: Topología MPLS y SDWAN

3. Resultados

Para el análisis se realizaron diferentes pruebas de tráfico con Python y la librería ping3, midiendo la latencia, jitter, paquetes perdidos, BER, consumo de ancho de banda, tasa de bits, paquetes enviados, tiempo de procesamiento, de

donde se obtuvieron los siguientes resultados tabulados desde la base de datos influx-db en conjunto con Grafana para las diferentes topologías [15], como se muestra en la Figura 12 y la Tabla 6.

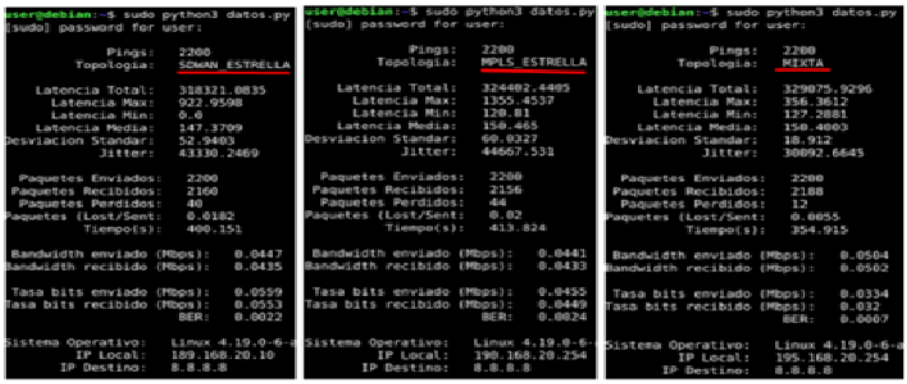


Figure 12: Envío de paquetes con python

Table 6: Resultados de la simulación

Network	Latencia (ms)	Desv. Stand.	Jitter (ms)	Paquete Perdido	Tiempo (s)	Bandwidth (Mbps)	Tasa Bits (Mbps)	Bit Error Rate (BER)
Mixta	329076	18.9	30093	12	355	0.101	0.0654	0.0007
SDWAN Malla	334238	57.7	48146	15	366	0.0975	0.103	0.0008
SDWAN Estrella	318321	52.9	43330	40	400	0.0882	0.111	0.0022
MPLS Malla	324983	34.8	46215	45	416	0.0851	0.0885	0.0025
MPLS Estrella	324402	60	44668	44	414	0.0874	0.0904	0.0024

3.1. Latencia y desviación estándar

De los resultados obtenidos, se tiene que la latencia promedio es similar entre todas las topologías, sin presentar mayores variaciones, siendo la topología con menor latencia SDWAN-MALLA con un valor de 147.37ms; en términos de estabilidad, la red mixta presentó una desviación estándar de 18.91, lo que significa que los valores de latencia en general fueron muy similares, como muestra la Figura 13.

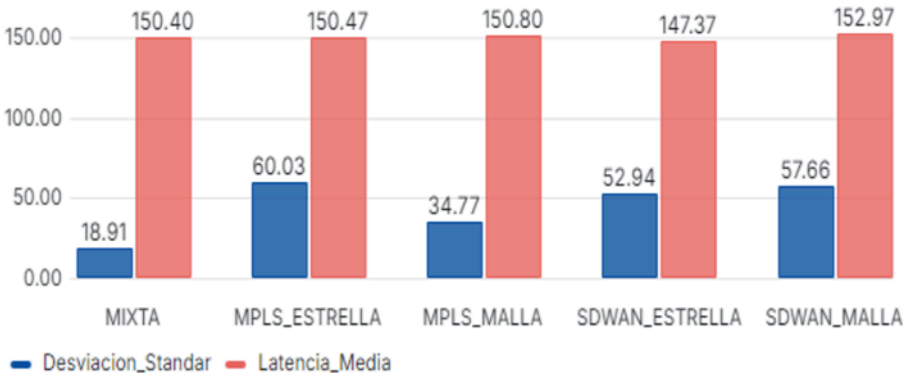


Figure 13: Latencia y desviación estándar

3.2. Ancho de banda y tasa de bits

En cuanto al ancho de banda total consumido y la tasa de bits, los resultados muestran que la topología estrella de la red SD-WAN es la más eficiente, registrando un mayor consumo de ancho de banda (0.111 Mbps) y una tasa de transferencia de 0.888 Mbps, como muestra la Figura 14.

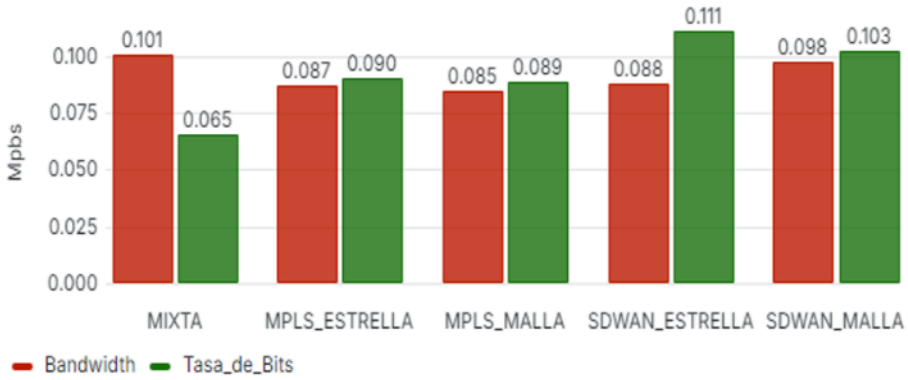


Figure 14: Gráfica de ancho de banda y tasa de bits

3.3. Jitter

El análisis del jitter presentado en la figura, muestra que la topología SD-WAN MALLA, tiene el mayor valor con un 22.66 %, indicando que existe una alta fluctuación en los tiempos de respuesta, sugiriendo que esta topología es susceptible a variaciones y la menos estable, como muestra la Figura 15.

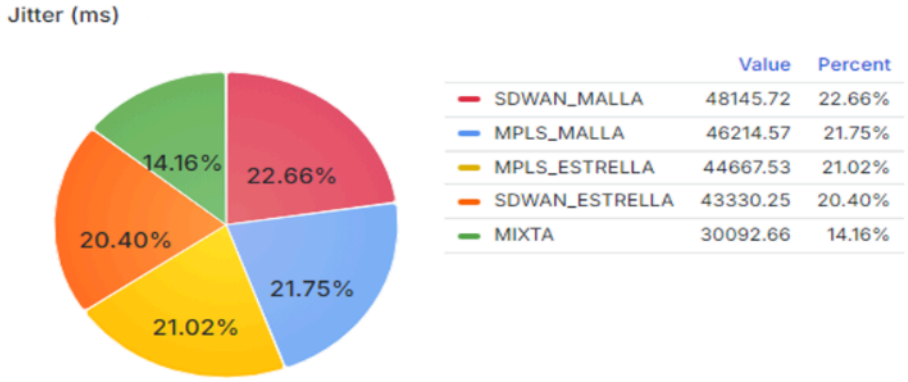


Figure 15: Gráfica de jitter

3.4. Paquetes enviados

En cuanto a la cantidad de paquetes enviados y perdidos, la topología MPLS MALLA presenta la mayor cantidad de paquetes perdidos con 44 paquetes de 2200, por el contrario, la topología mixta, presenta apenas 12 paquetes perdidos, siendo la mejor en este análisis como muestra la Figura 16.

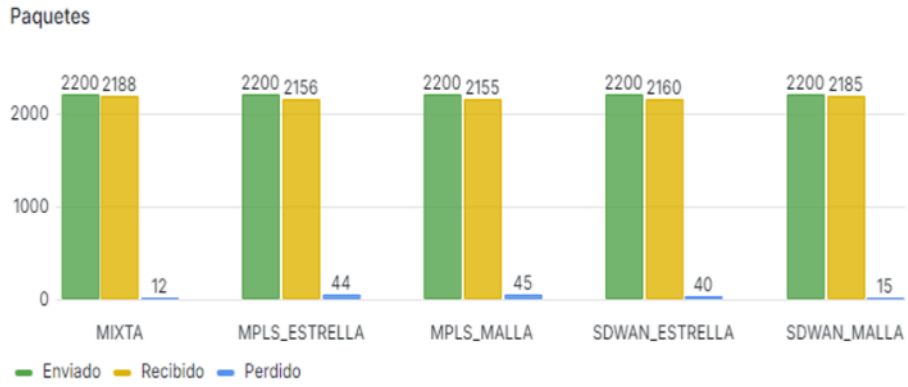


Figure 16: Gráfica de paquetes perdidos

3.5. Tiempo de procesamiento

En el envío de paquetes, la red mixta presenta mayor rapidez al procesar la información con tan solo 355 segundos, mientras que MPLS MALLA, fue la que más demoró con 416 segundos, siendo más eficientes las topologías SD-WAN, como se evidencia en la Figura 17.

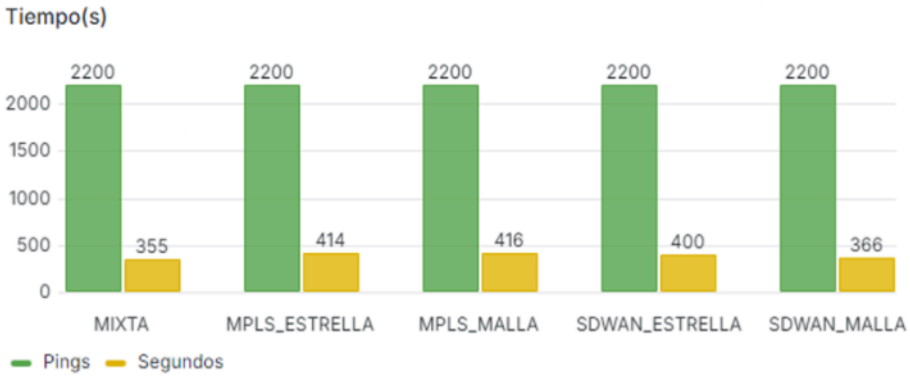


Figure 17: Grafica tiempo de procesamiento

3.6. Bit error rate

En este caso la topología MPLS presenta un valor elevado de 29 % y 27 % en MPLS malla y estrella respectivamente, en comparación con SD-WAN que solo fue de 25 % y 9 %, entendiendo que MPLS es más propenso a errores vs SD-WAN, como se ve en la Figura 18.

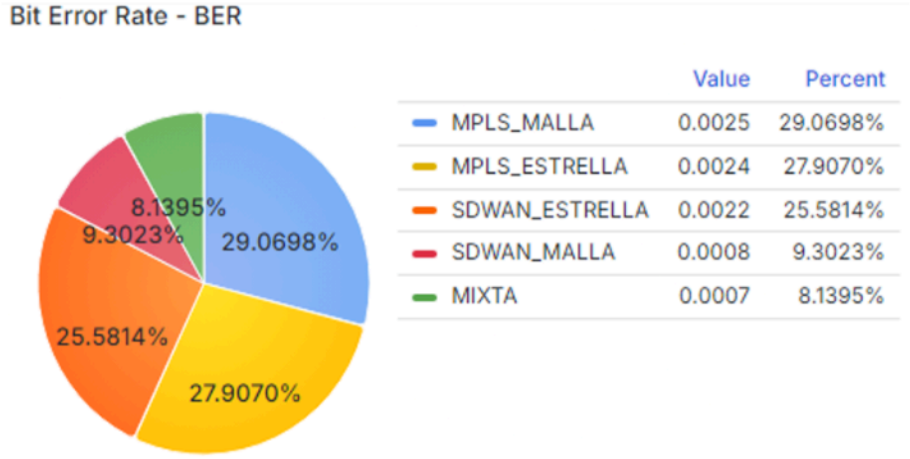


Figure 18: Gráfica BER

4. Conclusiones

Para las pruebas realizadas se utilizó la herramienta Ping, que con el uso de Python permite realizar la automatización y presentación de algunas métricas sin volver caótico este proceso, en este caso las métricas resultantes de esto son latencia total, máxima y media, desviación estándar, jitter, número de paquetes enviados, recibidos y perdidos, tiempo, tasa de bits y ancho de banda consumido.

De las pruebas realizadas en los diferentes escenarios como son la topología MPLS tipo estrella y malla, y la topología SD-WAN tipo estrella y malla, así como la topología mixta, podemos iniciar analizando el parámetro de paquetes perdidos, donde las topologías tipo SD-WAN muestran sin duda una evidente superioridad ante las topologías tipo MPLS, por ejemplo, la topología SD-WAN tipo malla presenta una pérdida de apenas 15 paquetes extraviados

vs ante la topología MPLS tipo malla que tiene un valor de 45 paquetes perdidos, es decir, casi el triple se encontró en las pruebas realizadas, teniendo así las topologías SD-WAN con un mejor rendimiento [16].

Otro parámetro a analizar sus resultados es el tiempo de procesamiento, el cual mide el tiempo en procesar todos los paquetes enviados en estas pruebas, para todas las topologías se enviaron flujos de datos de 2200 pings, donde las topologías tipo SD-WAN mostraron una mejor respuesta ante las topologías MPLS, por ejemplo, la topología SD-WAN tipo malla, presenta un tiempo de procesamiento de 366ms en esta prueba; por otro lado, la topología MPLS tipo malla presenta un tiempo de procesamiento de 416ms, consolidando a las redes con SD-WAN las topologías con mejor rendimiento al momento de procesar paquetes.

El BER que hace referencia a la tasa de error de bit es otro parámetro evaluado en las pruebas de las diferentes topologías. De las pruebas realizadas, las topologías tipo MPLS presentaron un BER alto en comparación con las topologías tipo SD-WAN, un ejemplo de ello es que la topología tipo malla MPLS presenta un BER de 0.0025, frente a la topología SD-WAN tipo malla, que solo tiene un 0.0008, esto nos muestra que hay una probabilidad del 0.25 % de que un bit llegue con error en una red, siendo un valor relativamente alto en telecomunicaciones.

En el resto de parámetros medidos en las diferentes topologías, en general las de tipo SD-WAN presentan ligeras mejoras en conjunto con la topología tipo mixta, frente a las de tipo MPLS, por ejemplo, en la latencia SDWAN tipo estrella presenta una ligera mejora, en el jitter la topología tipo SDWAN estrella presentó un menor jitter en comparación con MPLS, en la pérdida de paquetes la red SDWAN tipo malla, presentó una pérdida de la tercera parte en comparación con MPLS, demostrando una mayor robustez en SDWAN. Si se evalúa a nivel general los resultados obtenidos de las diferentes pruebas en los diferentes escenarios, se tiene que en general, SDWAN presenta mejores resultados ante MPLS.

Referencias

[1] S. Meneses, Network Design Defined by Software on a Hyper-converged Infrastructure. Case Study: Northern Technical University FICA Data Center, 2020.

[2] Ema-Maria Galeș, V Croitoru, “Traffic Engineering and QoS in a Proposed MPLS-VPN”, IEEE, 2021.

[3] Basu, K.: Performance comparison of a SDN network be-tween cloud-based and locally hosted SDN controllers. IEEE (2018).

[4] I. Ramadža, J. Ožegović, and V. Pekić, ”Network performance monitoring within MPLS traffic engineering enabled networks,” in 2015 23rd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2015, pp. 315-319.

[5] S. Mansfield, E. Gray, and K. Lam, “Network Management Framework for MPLS-based Transport Networks,” Request for Comments: 5950, Internet Engineering Task Force, Sep. 2010.

[6] J. Wang, M. Bewong and L. Zheng, ”SD-WAN: Hybrid Edge Cloud Network between Multi-site SDDC,” Computer Networks, vol. 250, p. 110509, 2024.

[7] A. H. Abdi et al., ”Security Control and Data Planes of SDN: A Comprehensive Review of Traditional, AI, and MTD Approaches to Security Solutions,” in IEEE Access, vol. 12, pp. 69941-69980, 2024.

[8] Z. A. Bhuiyan, S. Islam, M. M. Islam, A. B. M. A. Ullah, F. Naz and M. S. Rahman, ”On the (in)Security of the Control Plane of SDN Architecture: A Survey,” IEEE Access, vol. 11, pp. 91550–91582, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3307467.

[9] Blenk, A.: Pairing SDN with network virtualization: the network hypervisor placement problem. IEEE (2015).

[10] Arpita Saxena: Improving Load Balancing through SD-WAN: Key Aspects to Not-to-beMissed,https://searchnetworking.te
WAN-vsload-balancing-How-are-they-different, 22 Sep 2022.

[11] C. Fu, B. Wang, H. Liu and W. Wang, ”Software-defined virtual private network for SD-WAN,” Electronics, vol. 13, no. 13, p. 2674, 2024, doi: 10.3390/electronics13132674.

[12] S. Oladosu, C. C. Ike, P. Adepoju, A. Afolabi, A. Ige and O. Amoo, ”The future of SD-WAN: A conceptual evolution from traditional WAN to autonomous, self-healing network systems,” Magna Scientia Advanced Research and Reviews, vol. 3, no. 2, pp. 95–107, 2021, doi: 10.30574/msarr.2021.3.2.0086.

[13] Vora, J.: Performance evaluation of SDN based virtualization for data center networks. IEEE (2018).

[14] Kshira Sagar Sahoo et. Al: A Comprehensive Tutorial on Software Defined Network: The Driving Force for the Future Internet Technology, ACM, ISBN 978-1-4503-4213-1/16/08, DOI: http ://dxdoi.org/10.1145/2979779.2983928, 2016.

[15] A. H. Alhilali and A. Montazerolghaem, "Artificial intelligence based load balancing in SDN: A comprehensive survey," Internet of Things, vol. 22, p. 100814, 2023.

[16] Ventre, P.L.: Deploying SDN in G EANT production network. IEEE (2017).

EDITORIAL UTN
IBARRA - ECUADOR



latindex
Crossref
Google Scholar
RERCIE
Red de Editores y Revistas Científicas Ecuatorianas
MIAR
Matriz de Información para el Análisis de Revistas
ORCID