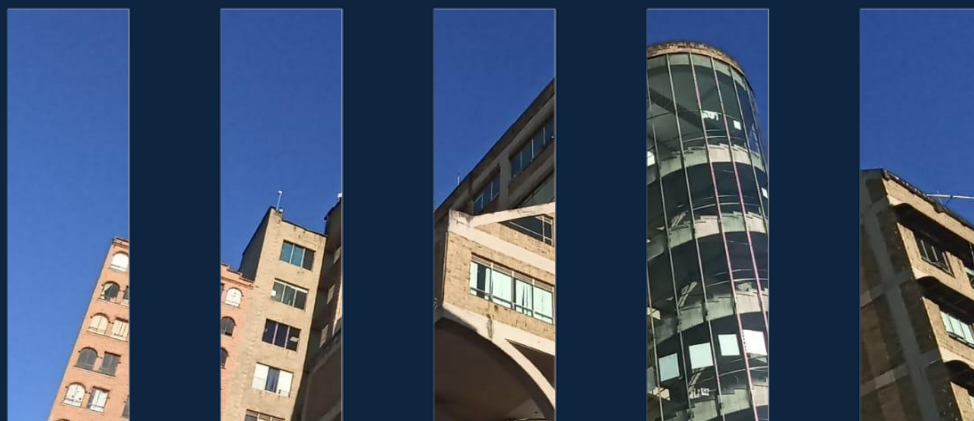


PROCEEDINGS OF THE FACULTY OF ENGINEERING, UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



ISSN: 3028-6727 (en línea)

Vol: 3

No.: 1

Year: 2024

Annual Volume



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

Doctorado
en Ingeniería

<http://doctoradoingenieria.udistrital.edu.co>

Juan Carlos Figueroa-García Ph.D. – Ed.
Elvis Eduardo Gaona García Ph.D. – Ed.



PROCEEDINGS OF THE FACULTY OF ENGINEERING,
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
VOL 3 - 2024

Memorias de los eventos de la Facultad de Ingeniería
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN: 3028-6727 (en línea)

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Rector: Dr. Giovanni Tarazona

Vicerrectora Académica: Dra. Mirna Jirón Popova

Vicerrector Administrativo: Elverth Santos Romero

Decano Facultad de Ingeniería: Dr. Jose Ignacio Rodriguez
Molano

Director Doctorado en Ingeniería: Elvis Eduardo Gaona-García
Ph.D.

Juan Carlos Figueroa-García Ph.D.

Elvis Eduardo Gaona-García Ph.D.

Comité Científico

Germán Hernández Ph.D., Universidad Nacional de Colombia

Carlos Franco Ph.D., Universidad del Rosario

Lindsay Álvarez Pomar Ph.D., Universidad Distrital Francisco
José de Caldas

Álvaro David Orjuela Cañón Ph.D., Universidad del Rosario

Árbitros Volumen 2

Germán Mendez Giraldo Ph.D., Universidad Distrital Francisco
José de Caldas

Yesid Díaz M.Sc., Universidad de La Salle

Dr. Roman Neruda, Informatics Dept. Charles University Prague,
Czech Republic

Feizar Javier Rueda-Velazco Ph.D., Universidad Distrital
Francisco José de Caldas

John Leonardo Vargas Mesa M.Sc., Universidad del Rosario

Diana Guzmán Ph.D. (C), Universidad Javeriana

Dr. Petra Vidnerova, Informatics Dept. Charles University Prague,
Czech Republic

Nelson Díaz Aldana Ph.D., Universidad Distrital Francisco José
de Caldas

Carlos Franco Ph.D., Universidad del Rosario

Diego León Ph.D. (C), Universidad Externado

Gestión Editorial

Juan Carlos Figueroa-García Ph.D.

Corrección de Estilo

Elvis Eduardo Gaona-García Ph.D.

Diagramación y montaje de cubierta

Juan Carlos Figueroa-García Ph.D.

Imagen de portada

Juan Carlos Figueroa-García Ph.D.

Periodicidad

Anual

Dirección: Cra 7 # 40B- 53 – Semisótano administrativo, Bogotá D.C. – República de Colombia

Teléfono: (+57) 6013239300 Ext: 1419 – 1402

email: doctoradoing@udistrital.edu.co

Sitio web: <https://doctoradoingenieria.udistrital.edu.co/memorias>

Prefacio

La vigencia e importancia de las técnicas de IA, los modelos de optimización y las metodologías de simulación se han mantenido a través de últimas décadas donde las aplicaciones computacionales de modelos y métodos en problemas de ingeniería son parte del desarrollo social. Así pues, los eventos organizados por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en el año 2024 son un medio por el cual sus autores hacen aportes al medio científico en diversos temas como IA, optimización, simulación, matemáticas, computación, bioingeniería, métodos y modelos de investigación de operaciones y otras aplicaciones. Todos los trabajos resumidos aceptados fueron revisados por un equipo de revisores y han pasado por un proceso editorial con el fin de compilar este segundo volumen que contiene dichos resultados de investigación.

Agradecemos al comité científico y el equipo de revisores por su ayuda incondicional en el proceso de revisión y aceptación de los trabajos. También agradecemos a los autores quienes son la piedra angular de este tercer volumen de abstracts y son los llamados a dar a conocer los desarrollos que se vienen dando en nuestra comunidad académica.

Diciembre 2024

Juan Carlos Figueroa-García Ph.D.
Elvis Eduardo Gaona-García Ph.D.
Editores

Índice general

Inteligencia Artificial

Aplicación de técnicas de deep learning en imágenes satelitales para la zonificación de vulnerabilidad ante inundaciones y gestión participativa del territorio con crowdsourcing: Estudio de caso en la vereda La Esperanza, municipio de Quebradanegra, Cundinamarca	1
<i>Maria Valentina Alvarez, Laura D. Díaz</i>	
Convolutional Neural Networks for early warning of fires with satellite images	6
<i>Martha P. Valbuena Gaona</i>	
Synthetic Accelerograms using the discrete wavelet Transform	10
<i>Alejandro A. Mira Caro, Freddy Bolaños, Juan Velasquez</i>	

Optimización

Uso de la simulación de Monte Carlo en los estudios de mercado, para la determinación del costo óptimo de obra civil en una institución pública colombiana	14
<i>Jorge Giovany Suarez-Pinilla</i>	
Optimización del proceso productivo de sistemas de iniciación: Una revisión de la literatura	18
<i>Daniela Bocanegra Florián, Eduyn Lopez-Santana</i>	
Análisis estadístico descriptivo y geoestadístico de las competencias genéricas de las pruebas Saber pro del año 2020 a 2021 en Colombia	24
<i>Wilson Rodríguez Calderón, Myriam Rocío Pallares Muñoz, Wilson Rodríguez Calderón, Myriam Rocio Pallares Muñoz</i>	
Architectural prototype for credit evaluation of Colombian SMEs based on digital banking ecosystems: A proof of concept (PoC)	28
<i>William Steven Rodriguez, Paulo Alonso Gaona-García</i>	
Decision making in the agricultural sector for the fruit harvesting process.	33
<i>Maria Paula Ruiz Nieto, Eduyn Lopez-Santana</i>	

Aplicaciones

Analysis and early dropout prediction of students at a virtual higher education institution: a data analytics approach	38
--	----

*Cindy N. Estrada, Julian Castillo, Sara Cañaverel, Jaime Andrés
Gutiérrez, Boris A. Salleg-Romero, Janeth I. Martinez-Florez*

Metodologías del planeamiento energético enfocadas a la expansión del sector de generación de energía eléctrica - Caso Colombiano	43
<i>Francisco David Moya</i>	

Estudio del uso de imágenes satelitales multitemporales y multisensor, para la identificación del cambio de cobertura a causa de la minería ilegal en el municipio de Istmina	48
<i>Maria Caceres, Andrea Natalia Peña Sosa, Jose Luis Herrera Escorcia, Martha P. Valbuena Gaona</i>	

A Risk assessment approach methodology to score vulnerabilities in airworthiness systems	53
<i>Wilmar N. Rengifo, Elvis Eduardo Gaona</i>	

Gestión energética de clústeres de microrredes eléctricas basada en dinámicas epidemiológicas	59
<i>Nelson A. Castañeda, , Nelson L. Diaz, Andrés Jutinico</i>	

An iterative methodology for evaluating large language models in IoT weather monitoring systems	64
<i>Ivan Dario Bello Gonzalez, Elvis Eduardo Gaona, Paulo Alonso Gaona-García</i>	

Introduciendo la circularidad en cadenas de suministro de IPS colombianas: Una priorización de prácticas de gestión utilizando DEMATEL	69
<i>Juan Camilo Vargas-Muñoz, Carlos Eduardo Moreno-Mantilla, Felix Antonio Cortes-Aldana</i>	

Energy Use for Project Management Methods, Challenges and Trends ...	73
<i>Andrés F. Guio</i>	

Adaptación del método de gestión del valor ganado (EVM) a proyectos con metodología Scrum: Una revisión de literatura	81
<i>Edilberto Hinestroza Obregón, Feizar Rueda</i>	

Functional and non-functional requirements prioritization methodologies in agile environments: A review of the Literature	86
<i>Julian Andres Gutierrez Londoño, Feizar Rueda</i>	

Toma de decisiones en programación de proyectos de construcción implementando programación dinámica y metodologías ágiles: una revisión de la literatura	91
<i>Luisa F. Hernández, Eduyn Lopez-Santana</i>	

El enfoque del sector público en la planificación logística urbana en la zona centro de Barranquilla: Consideraciones clave.....	96
<i>Diego Suero, Elkin Eduardo Rojas, Valentina Marquez</i>	

Aplicación de técnicas de deep learning en imágenes satelitales para la zonificación de vulnerabilidad ante inundaciones y gestión participativa del territorio con crowdsourcing: estudio de caso en la vereda la esperanza, municipio de Quebradanegra, Cundinamarca (2024)

M. Alvarez, L. Díaz, M. Valbuena & J. Medina

Abstract— Este trabajo aborda la intensificación de inundaciones asociada al cambio climático y La Niña, presentando una metodología que combina aprendizaje profundo, lógica difusa, análisis de imágenes satelitales y crowdsourcing para evaluar la vulnerabilidad en áreas rurales. Focalizándose en La Esperanza, Quebradanegra, el estudio integra datos sociodemográficos y aportes comunitarios esenciales para el desarrollo de estrategias participativas de mitigación de riesgos.

Palabras clave: Procesamiento de imágenes, Aprendizaje automático, Gestión de riesgos, Inteligencia artificial

I. INTRODUCCIÓN

La gestión del riesgo de inundaciones se enfoca en el estudio de la ubicación de construcciones rurales. Estos estudios resultan ser de vital importancia debido a la alta vulnerabilidad de estas estructuras ante la amenaza de las inundaciones durante el fenómeno de La Niña, la cual se ve intensificada por diversos factores como el

uso de materiales de construcción económicos, su ubicación en zonas propensas a desastres naturales y la deficiencia en el acceso a servicios básicos. Esta situación de vulnerabilidad convierte las zonas rurales en áreas susceptibles a sufrir los impactos de eventos adversos como son las inundaciones. Comprender a profundidad estos factores de riesgo es fundamental para desarrollar estrategias efectivas de prevención de desastres y garantizar la seguridad de las viviendas en estas comunidades.

La participación comunitaria es fundamental en la Gestión del Riesgo de Desastres., ya que involucra a todos los actores sociales y promueve el sentido de pertenencia y la adaptación a través del conocimiento local. La colaboración constante entre los diferentes interesados fortalece la capacidad de respuesta y recuperación. Sin embargo, los enfoques tradicionales en la gestión del riesgo presentan limitaciones al depender excesivamente de datos históricos, lo que reduce su capacidad de anticipar y responder de manera ágil a riesgos emergentes en entornos cambiantes. Esto socava la eficacia de las estrategias al no permitir una respuesta adecuada a situaciones imprevistas.

El objetivo de este estudio es la implementación de un enfoque innovador para la gestión del riesgo de inundaciones en construcciones rurales mediante la integración de técnicas de aprendizaje profundo, crowdsourcing y datos catastrales, utilizando como caso de estudio la vereda de La Esperanza en Quebradanegra, Cundinamarca.

III. FUNDAMENTOS CONCEPTUALES

A. PERCEPCIÓN REMOTA Y ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES

M. Alvarez está con la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Es estudiante de Ingeniería Catastral y Geodesia, Tecnólogo en Topografía, miembro de IEEE y miembro del semillero de investigación GRSS (e-mail: mvalvarezp@udistrital.edu.co).

L. Díaz está con la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Es estudiante de Ingeniería Catastral y Geodesia, líder del semillero de investigación GEIPER y miembro del grupo de investigación NIDE (e-mail: ladDiazb@udistrital.edu.co).

M. Valbuena está con ProCalculo PROSIS, donde es Líder de investigación. Tiene una Maestría en Ciencias de la Información y Comunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (e-mail: mvalbuena@procalculo.com).

J. Medina está con la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Tiene un Doctorado en Informática con Énfasis en Sistemas de Información Geográfica, es miembro de IEEE y miembro del semillero de investigación GRSS (e-mail: jmedina@udistrital.edu.co).

Este trabajo fue apoyado en parte por ProCalculo, quien proporcionó las imágenes para este proyecto.

La percepción remota y el análisis de imágenes satelitales son técnicas esenciales para estudiar las características terrestres a distancia. Estas metodologías utilizan sensores remotos pasivos los cuales detectan energía reflejada, o activos que emiten su propia energía para captar información detallada sobre aspectos geográficos, ambientales y sociales de la Tierra. La utilización de imágenes hiperespectrales, pancromáticas y la clasificación de satélites y sensores según sus características amplían las posibilidades de obtener datos precisos y relevantes, permitiendo aplicaciones como la monitorización ambiental, la planificación urbana, la gestión de recursos naturales y la evaluación de riesgos [1].

La teledetección se basa en la captura de datos a partir de sensores dispuestos en satélites [2]. Estos datos son enviados a una estación terrena donde se procesan y convierten en imágenes, proporcionando conocimiento sobre las características de la tierra en diferentes escalas espaciales [3].

B. CROWDSOURCING Y PARTICIPACIÓN COMUNITARIA EN LA GESTIÓN DEL RIESGO

El crowdsourcing es un modelo de colaboración que implica la contribución de la comunidad para obtener ideas, soluciones, contenido o servicios, aprovechando el conocimiento colectivo. Se basa en principios de apertura, transparencia e intervención de los participantes, involucrando a una comunidad diversa en la generación de ideas y resolución de problemas [4]. En el contexto de la gestión del riesgo en áreas rurales, la participación comunitaria a través del crowdsourcing es crucial. Involucrar a la comunidad en la identificación, evaluación y mitigación de riesgos fortalece el sentido de pertenencia y empoderamiento, permite comprender mejor los desafíos locales y soluciones potenciales, y fomenta la toma de decisiones más inclusiva y sostenible. La vulnerabilidad social, entendida como el grado de exposición a un peligro y asociada a las condiciones que limitan la resiliencia o resistencia [5], la participación ciudadana debe comprenderse como un proceso de construcción de responsabilidades y derechos ambientales que promuevan el diseño y la evaluación de políticas públicas locales y regionales para la prevención, atención y mitigación de los desastres. Es fundamental la implementación de proyectos apoyados en procesos de sensibilización, que fomenten cambios de perspectiva con el fin de identificar, prevenir y actuar ante la ocurrencia de un fenómeno natural, minimizando la vulnerabilidad y afectación socio ambiental. [6]

C. GESTIÓN DE RIESGOS RURALES APRENDIZAJE PROFUNDO Y LÓGICA DIFUSA

La Inteligencia Artificial (IA) ha ganado relevancia en la gestión de riesgos rurales gracias a técnicas como Machine

Learning y Deep Learning. Machine Learning desarrolla algoritmos que aprenden de datos, identificando patrones y realizando predicciones precisas, Deep Learning, por su parte, emplea redes neuronales para analizar grandes conjuntos de datos complejos; además, la lógica difusa complementa estas técnicas al manejar la incertidumbre inherente a la evaluación de riesgos rurales; la combinación del aprendizaje profundo y la lógica difusa brinda un marco adaptable y preciso, aprovechando las capacidades de análisis de datos complejos y el manejo de la ambigüedad, respectivamente, para abordar de manera efectiva los desafíos únicos de las zonas rurales. [7]

El aprendizaje de disparo cero y el aprendizaje de una sola vez son conceptos clave en el desarrollo de modelos de inteligencia artificial que buscan manejar datos escasos o limitados de manera efectiva [8]. Estas capacidades permiten a los modelos hacer predicciones correctas incluso cuando se enfrentan a nuevas categorías o instancias que no han visto durante el entrenamiento.

Una técnica que puede mejorar el rendimiento de los modelos utilizando un solo ejemplo es PerSAM y PerSAM-F, las cuales pueden ajustar dinámicamente el modelo a nuevas muestras sin requerir un proceso de entrenamiento completo; además, existen métricas importantes para evaluar el desempeño de los modelos, como la Intersección sobre Unión (IoU), que mide qué tan bien un modelo de segmentación coincide con la segmentación real; la Precisión de Píxeles, que calcula cuántos píxeles se identificaron correctamente; el Coeficiente del Dado, que cuantifica cuánto tienen en común dos muestras; la Tasa de Verdaderos Positivos (TPR), que muestra la relación entre los casos positivos reales reconocidos correctamente; y la Tasa de Falsos Positivos (FPR), que indica la frecuencia con la que el modelo clasifica erróneamente los casos negativos como positivos. [8]

Por otro lado, la lógica difusa es una metodología que puede complementar el aprendizaje profundo, al permitir modelar y procesar información imprecisa o incierta de manera flexible y robusta. La lógica difusa se basa en procesar datos y generar salidas que pueden procesarse para solucionar la situación planteada tras obtener datos resultantes. [9] Esta capacidad de manejar la incertidumbre y la ambigüedad puede ser de gran utilidad en la evaluación de la vulnerabilidad de las construcciones rurales, al integrar factores cualitativos y cuantitativos de manera más realista.

D. GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES

Las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica

En Colombia las inundaciones van en aumento y a su vez los impactos socioeconómicos, ambientales, institucionales y estructurales; todo esto debido al deterioro progresivo de las cuencas y los cauces de los ríos y quebradas, el taponamiento de drenajes naturales que limitan las ciénagas, el aumento de procesos erosivos, la intensificación de la deforestación, las quemas, la ocupación de las rondas hídricas, entre otros [12].

III. OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS EN LA GESTIÓN TERRITORIAL MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

La eficiencia en la gestión territorial implica una recopilación y análisis de datos fundamentales para la planificación y toma de decisiones, el uso de técnicas avanzadas basadas en inteligencia artificial garantiza una reducción en los tiempos y procesos de análisis de imágenes satelitales. La inteligencia artificial, proporciona una extracción de información sobre las imágenes con mayor precisión en la identificación de zonas vulnerables a inundaciones, mediante la detección de patrones y características que serían difíciles de reconocer con otras metodologías en el mismo lapso. Esto facilita la toma de decisiones en tiempo real, esencial para la gestión territorial efectiva, donde la rapidez y confiabilidad de los resultados son clave para detectar áreas vulnerables y aplicar estrategias de mitigación basadas en datos de calidad.

IV. METODOLOGÍA

A continuación, se presenta el proceso metodológico por medio del cual, a partir de imágenes satelitales y datos adquiridos a partir de crowdsourcing para la definición de áreas vulnerables a inundaciones ante las dinámicas climáticas del Fenómeno de la Niña

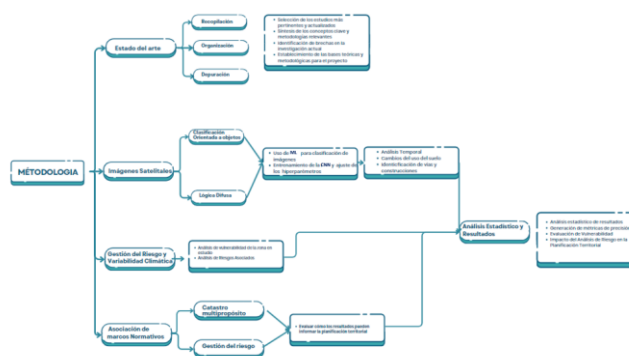


Fig. 1. Metodología Integrada para el Análisis y Gestión de Riesgos mediante Teledetección y Aprendizaje Automático

A partir del enfoque integral que se propone en esta investigación, se estructuran cuatro componentes principales que abordan diferentes aspectos del problema:

Estado del arte: Esta fase inicial establece los cimientos del proyecto mediante la recopilación, organización y depuración de información existente, se enfoca en identificar brechas en la investigación actual, definir conceptos clave y sentar las bases teóricas y metodológicas del proyecto.

Análisis de imágenes satelitales: Representa el núcleo tecnológico de la metodología, donde se aplican técnicas avanzadas de aprendizaje automático, especialmente redes Neuronales Convolucionales (CNA), estas se utilizan para la extracción de construcciones y vías sobre datos satelitales, permitiendo una interpretación más precisa. Este proceso incluye el entrenamiento de las CNA y el ajuste de sus hiperparámetros, así como el análisis temporal mediante clasificaciones basadas en Machine Learning para identificar patrones y cambios a lo largo del tiempo.

Asociación de marcos normativos: Esta fase vincula los hallazgos analíticos con aspectos legales y de planificación territorial, la gestión del riego y lo que hoy por hoy en nuestro país busca regular la implementación de la inteligencia artificial.

Finalmente, la metodología converge en un análisis estadístico y la síntesis de resultados, donde se integrarán los hallazgos de todas las fases anteriores.

V. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Quebradanegra se encuentra ubicado en la vertiente occidental de la Cordillera Oriental, en el departamento de Cundinamarca, Colombia. Este municipio limita al norte con el municipio de Utica, al oriente con los municipios de La Peña y Nimaima, al sur con el municipio de Villeta y al

occidente con el municipio de Guaduas [13]. Su relieve es montañoso, con altitudes que van desde los 800 hasta los 3600 metros sobre el nivel del mar. En cuanto a la hidrografía, la principal fuente hídrica del municipio es la Quebrada Negra, que nace en el municipio de Villeta y desemboca en el municipio de Utica, con una longitud de 25 kilómetros y una cuenca de 104 kilómetros cuadrados [14].

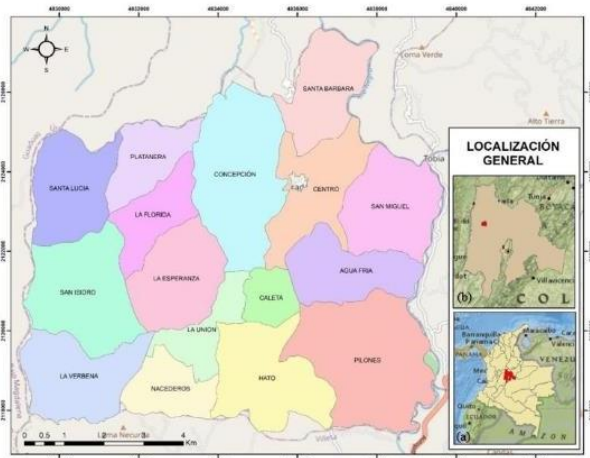


Fig. 2. Mapa de ubicación del municipio de Quebradanegra (a) Ubicación a nivel país, Colombia (b) Ubicación a nivel departamental, Cundinamarca [15]

En lo que respecta a la vegetación, esta también varía según la altitud, encontrándose bosque alto andino en las zonas más altas y bosque seco tropical en las zonas más bajas. De manerasimilar, los suelos son de origen volcánico y sedimentario, siendo francos arenosos en las zonas altas y arcillosos en las zonas bajas. Este trabajo se lleva a cabo en la Vereda La Esperanza, la cuallimita al norte con la vereda La Florida; por el oriente con la vereda Concepción y vereda La Unión; por el sur con la veredaLa Unión y Verbena y por el occidente con la vereda San Isidro [16].

VI. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE LAS REDES NEURONALES UTILIZADAS

Las CNN toman una imagen de entrada y predice la presencia de objetos, tales como vías y construcciones a partir del recorrido por ventanas sobre la imagen. Las CNN se compone de dos etapas: extracción de elementos y clasificación [17]. Esta arquitectura puede mejorar los métodos tradicionales de reconocimiento de características y clasificación de imágenes, como el aprendizaje de máquina superficial, incorporando caracterizaciones de patrones dentro del dominio(s) de interés tales como el espacio bidimensional o tridimensional, tiempo, profundidad bajo tierra o altura sobre tierra, o patrones de reflectancia espectral a través de un rango definido de longitudes de onda electromagnéticas [18].

VII. LÓGICA DIFUSA EN LA GESTIÓN DEL RIESGO

A partir de Modelos Digitales de Elevación se extraen modelos hidrológicos sobre los cuales, se modelan escenarios asociados a la presencia de lluvias torrenciales que generan inundaciones, identificando áreas cercanas a los cuerpos de agua que resultan vulnerables a estos fenómenos [10].

Métodos tradicionales determinan la vulnerabilidad a partir de variables tales como la altura, la pendiente y la distancia a los cuerpos de agua. Sin embargo, debido al cambio climático este análisis regional deja de ser suficiente para el modelamiento del riesgo y se requiere la incorporación de modelos que faciliten el análisis local de los fenómenos naturales. La lógica difusa se integra como un modelador capaz de identificar la vulnerabilidad local, adaptándose a las condiciones topográficas del entorno, para identificar áreas susceptibles a inundaciones [19].

Adicionalmente, con la extracción de elementos antrópicos tales como vías y construcciones, e integrando el crowdsourcing, se identifican elementos vulnerables con el fin de apoyar el proceso de ordenamiento territorial y la definición de estrategias asociadas con la prevención y reducción del riesgo de desastres asociados al Fenómeno de la Niña.

VIII. CONCLUSIONES

El estudio propone un enfoque innovador para la gestión del riesgo en construcciones rurales, integrando técnicas de aprendizaje profundo, crowdsourcing y datos catastrales, utilizando como caso de estudio la vereda La Esperanza en Quebradanegra, Cundinamarca.

La participación comunitaria a través del crowdsourcing es fundamental para la gestión del riesgo en áreas rurales, ya que permite involucrar a la comunidad en la identificación, evaluación y mitigación de riesgos, fortaleciendo el sentido de pertenencia y empoderamiento.

El uso de técnicas de aprendizaje profundo y lógica difusa permite detectar automáticamente las construcciones y una evaluación detallada de su vulnerabilidad, lo que lleva a formular estrategias efectivas para la mitigación de riesgos derivados de inundaciones y la planificación del desarrollo rural.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el invaluable apoyo de Procalculo en esta investigación. Su contribución consistirá en proporcionar las imágenes de alta calidad y el entorno de máquina virtual potente que serán esenciales para llevar a cabo nuestro análisis. Un agradecimiento especial a M. Valbuena

(Co-Autor, mvalbuena@procaculo.com), Líder de Investigación y Desarrollo de Procalculo, por su conocimiento técnico y su disposición a ayudarnos en todo el proyecto. Presentamos nuestro agradecimiento a Javier Medina professor de la Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas por su apoyo y retroalimentación durante la realización de este proyecto, su tiempo y orientación han sido fundamentales para nuestra investigación. Finalmente, expresamos nuestra gratitud por la invaluable colaboración que ha enriquecido significativamente nuestro trabajo.

REFERENCIAS

- [1] E. Chuvieco, teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio, ariel publ., 2010.
- [2] Natural resources canada, fundamentals of remote sensing, Canadá, 2015.
- [3] R. A. Salas t, w. j. olivas castro y m. williamson cuthbert, "análisis multitemporal de la cobertura de manglar en la reserva cayos miskitos, 2006-2017", rev. univ. del caribe, vol. 22, n.º 1, pp. 61–68, septiembre de 2019. doi: 10.5377/ruc.v22i1.8419
- [4] M. Alam, "¿Qué es el crowdsourcing? Definición, tipos, ventajas, ejemplos y buenas prácticas," IdeaScale, 22-dic-2023.
- [5] Unidad nacional para la gestión del riesgo de desastres, guía para la participación comunitaria en la gestión del riesgo de desastres, bogotá, colombia, 2017.
- [6] M. M. Ordóñez-díaz, l. m. montes-arias y g. d. p. garzón-cortes, "importancia de la educación ambiental en la gestión del riesgo socio-natural en cinco países de américa latina y el caribe", rev. electrón. educ., vol. 22, n.º 1, p. 1-19, diciembre de 2018. doi: 10.15359/ree.22-1.17
- [7] M. M. Jiménez, "Inteligencia Artificial en la Gestión de Riesgos," Piran Risk, 15-feb-2023
- Universidad nacional de colombia- ideam, zonificación de amenazas por inundaciones a escala 1:2.000 y 1:5.000 en áreas urbanas para diez municipios del territorio colombiano, contrato no. 408-2013, 2013.
- [8] L. P. Osco et al., "the segment anything model (sam) for remote sensing applications: from zero to one shot", int. j. appl. earth observation geoinf., vol. 124, p. 103540, noviembre de 2023. doi: 10.1016/j.jag.2023.103540
- [9] C. Rebato, "Descubre la relación entre las redes neuronales artificiales, la inteligencia artificial y el eHealth", Think Big, 2020
- [10] Universidad Nacional de Colombia- IDEAM, "ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR INUNDACIONES A ESCALA 1:2.000 y 1:5.000 EN ÁREAS URBANAS PARA DIEZ MUNICIPIOS DEL TERRITORIO COLOMBIANO,"
- [11] UNGRD, unidad nacional de gestión del riesgo de desastres - terminología sobre gestión del riesgo de desastres y fenómenos amenazantes, 2020.
- [12] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, "Informe sobre el Desarrollo Humano 2007-2008. Lucha contra el cambio climático: Solidaridad frente a un mundo dividido," New York, Estados Unidos: Grupo Mundi-Prensa, 2007
- [13] CMGRD Quebradanegra, "Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres Quebradanegra," Quebradanegra, dic. 2016.
- [14] Autoridad Ambiental con Alternativas de Desarrollo, "Delimitación y Localización de las Cuencas Quebrada Negra Informe POMCA-001 UT," Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), 2014
- [15] Base cartográfica IGAC, 2018.
- [16] J. C. Triana león y d. barragán ordoñez, "por medio de la cual se adopta el plan de desarrollo del municipio de quebradanegra-cundinamarca 2016-2019," alcaldía municipal de quebradanegra, quebradanegra, cundinamarca, 2016.
- [17] A. Abdollahi, B. Pradhan, N. Shukla, S. Chakraborty, y A. Alamri, «Deep Learning Approaches Applied to Remote Sensing Datasets for Road Extraction: A State-Of-The-Art Review», *Remote Sens.*, vol. 12, n.º 9, Art. n.º 9, ene. 2020, doi: 10.3390/rs12091444.
- [18] A. E. Maxwell, Odom, C. M. Shobe, D. H. Doctor, M. S. Bester, y O. Tobi, «Exploring the influence of input feature space on CNN-based geomorphic feature extraction from digital terrain data», *Earth Space Sci.*, vol. 10, n.º e2023EA002845, 2023, doi: <https://doi.org/10.1029/2023EA002845>.
- [19] N. Luo et al., «Fuzzy Logic and Neural Network-based Risk Assessment Model for Import and Export Enterprises: A Review», *J. Data Sci. Intell. Syst.*, jun. 2023, doi: 10.47852/bonviewJDSIS32021078.

Convolutional Neural Networks for early warning of fires with satellite images

Valbuena Gaona Martha Patricia. *Procalculo*

Abstract— The El Niño phenomenon influences global climate variability, creating extreme conditions that lead to forest fires. Satellite images are key in their monitoring, with effective artificial intelligence techniques for their detection. Convolutional Neural Networks - CNN is fundamental, surpassing traditional models in image classification. Planet Scope Super Dove satellite constellation facilitates high-precision fire detection.

Index Terms—Artificial Intelligence, Deep Learning, Spectral Indices

I. INTRODUCTION

El Niño phenomenon is the warm phase of the El Niño-Southern Oscillation - ENSO, which is the dominant factor of climate variability on Earth. Fluctuations in sea surface temperature in the eastern equatorial Pacific create two opposite effects: warmth The Child and the Cold These phenomena generate significant ecological and social impacts worldwide [1]. Climate change is a potential factor for climate phenomena to become increasingly extreme. During the El Niño periods, climate change creates a potential environment for fires to be triggered, by promoting warm and extreme drought conditions [2]. Forest fires play a formative role in the dynamics of forest ecosystems. shaping the distribution, structure, and composition of vegetation in many systems. Forest fire activity is expected to increase worldwide with climate change [3].

Satellite imagery plays an important role in the monitoring of forest fires worldwide. The advantages include extensive regional coverage and regular and cost-effective accessibility of challenging areas [4]. To automate fire identification processes, several artificial intelligence techniques have been developed. Fire extraction methodologies based on artificial intelligence methods on multi-spectral satellite images prove to be highly effective as the algorithms are based on the totality of spectral bands contained in the images. In addition, spectral indices often combine information from portions of the visible electromagnetic spectrum, near infrared and medium infrared. These bands are sensitive to variations in soil color (visible and medium infrared), soil composition (medium infrared), moisture and chlorophyll (near infrared) which are properties of the soil and vegetation that can be significantly affected by fire [5].

Convolutional Neural Networks - CNN architectures surpassed

features-based models in the field of image processing and solved many problems. However, they require a lot of recorded data for training. CNNs are the most used and successful image classification models [6]. In general, a CNN takes an input image and predicts the presence of objects, such as forest fires, as an output. CNN consists of two stages: element extraction and classification [7].

This architecture can enhance traditional methods of character recognition and image classification, such as surface machine learning, by incorporating characterization of patterns within the domain(s) of interest (e.g., two-dimensional or three-dimension space, time, depth underground or height on the ground, or spectral reflection pattern through a defined range of electromagnetic wavelengths) [8].

However, forest fires are complex physical processes involving different interrelated factors, such as climate, topography, soil humidity, fuel type and location and source. Furthermore, forest fires are dynamic and can occur on different spatial and temporal scales. Therefore, precise detection and segmentation of forest fires using traditional remote observation algorithms is often difficult, as it requires the modelling of complex functional relationships between numerous data. The coverage of clouds and smoke, generated during the combustion process, also restricts the ability to detect fires from space. All this makes forest fires a difficult phenomenon to map, which is a crucial element in an effective response by the responsible authorities and the understanding of the consequences of fires [9].

II. MATERIALS AND METHODS

Planet Labs has launched a constellation of more than 200 Dove satellites with the ability to generate up to 200 million square kilometers of PlanetScope images per day with the possibility of daily reviews for any location. The latest Super Dove satellites with the PSB.SD sensor captures eight bands ranging from 430 to 890 nm. Even from an altitude of 475 km, the PlanetScope space resolution manages to reach three meters with a review time of one day. All these features of the constellation of Super Dove facilitate the detection of fires from spectral analysis and permanent monitoring and management of our planet, The Earth [10].

Forty-three samples of wildfires located in Colombia, Ecuador, and Panamá were extracted and downloaded from

Planet Explore Platform in Surface Reflectance Level for analysis.



Fig. 1. Wildfire captured by Planet Scope Colombia, Santander 2024. Planet Labs PBC. All rights reserved. 2024

Sixty samples composed of land covers such as water bodies, buildings, forests, crops, and clouds were tagged “No wildfire”. The reason to include clouds is because of the meteorological conditions of Colombia Ecuador, and Panamá promote a high presence of these elements, and the optical sensor captures this information. Clouds in true color could be wrongly tagged as wildfire, for this reason, was necessary the incorporation of no-optical bands for its differentiation.



Fig. 2. Cloud appearance in true color Panamá, Ciudad de Panamá 2024. Planet Labs PBC. All rights reserved. 2024

The code was developed in Python, implementing libraries such as Tensorflow and Rasterio. TensorFlow is a deep learning programming system that expresses calculations in the form of a computational graph. The TensorFlow development flow diagram is mainly divided into two stages: construction and execution. Three models in TensorFlow correspond to the calculation model: calculation chart, data model: tensor, and model in execution: session. TensorFlow data is represented by a Tensor data structure, Flow represents the flow and calculation of the data. The feed or fetch can be used to assign or retrieve the data in the tensor [11]. Rasterio is a library that includes methods related to the analysis, processing, and

interpretation of satellites, drones, or captured by airborne sensors [12].

III. RESULTS

From the collection of samples of fires that were captured during January, February, and March of 2024, a solid data set for CNN training is established. The eight bands of Planet Scope Images allow a better understanding of the wildfires, with the Near Infrared the detection of wildfires is improved due to the spectral response of calcinated areas in this electromagnetic spectrum.

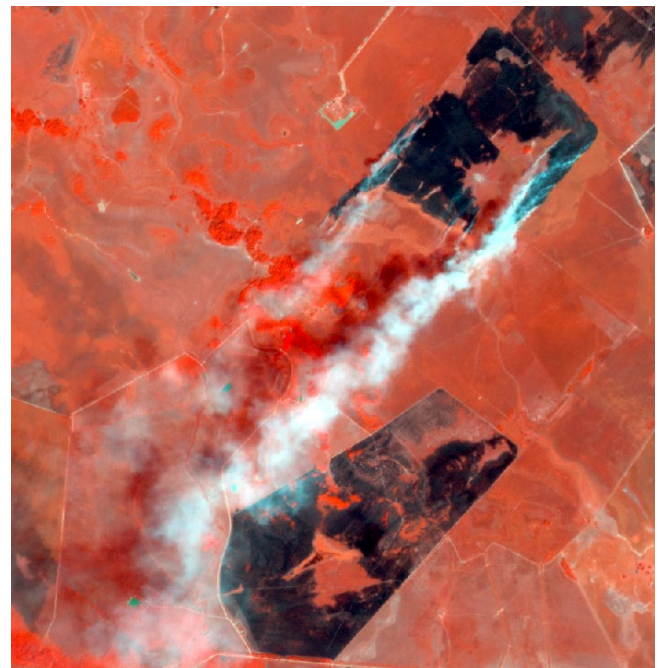


Fig. 3. Wildfire appearance in false color with NIR, green and blue spectral bands Colombia, Casanare 2024. Planet Labs PBC. All rights reserved. 2024

Seventy percent of the sampling was implemented for training and the remaining thirty for validation. Adaptive Moment Estimation – ADAM is a very popular training algorithm for deep neural networks, implemented in many machine learning frameworks [13]. This optimization algorithm has been designed for deep learning approaches. The great importance of the algorithm is that it finds individual adaptive learning rates for various parameters. The name of the algorithm is based on the adaptive moment estimation procedure of the algorithm. The first and second-moment estimations of gradients are used for adapting the learning rate for every weight of the deep neural network. The first and second moments are known as mean and variance, respectively. Adam's algorithm uses exponentially moving averages for the estimation of moments in each batch at every iteration [14].

The results obtained by CNN prove to be more than 85%, which represents a great accuracy for the detection of these natural phenomena.

The differentiation of clouds and fumes is facilitated by the analysis of the Calcined area using the Near Infrared and Red indices, which highlight the area affected by the fire.

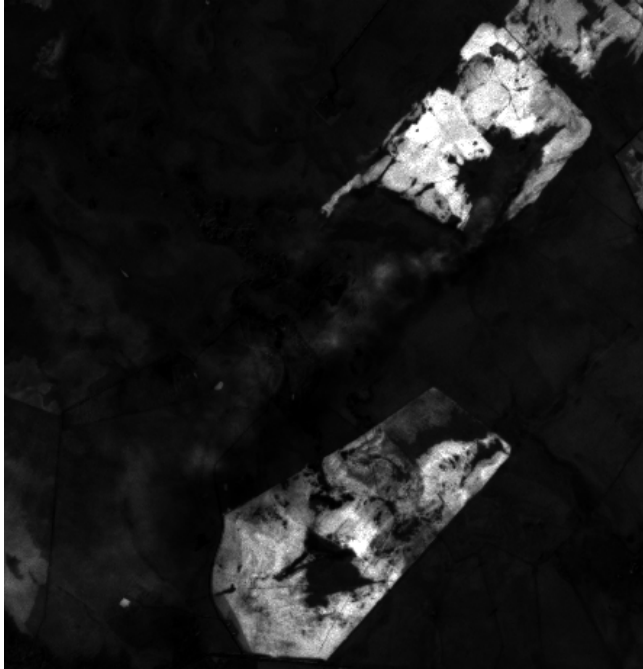


Fig. 4. Calcinated Area Index for Wildfire detection

IV. DISCUSSION

The use of a data cube facilitates the detection of plant cover loss, which is another differential factor for the extraction of these affected areas [15].

Once fires are detected, it is possible to monitor their spread which makes it easier for environmental and state authorities to take measures to prevent them from spreading.

From series of time and exogenous factors such as air currents, temperature, and presence of vegetation can help to model the trend of the fire track, severity, and occurrence based on the territorial elements extracted from satellite data.

Other sensors such as drones facilitate the continuous tracking of the fire, however, due to the thick fumes it is possible that the atmosphere is not suitable for the handling of these instruments, so the satellite images are appropriate for this analysis.

V. CONCLUSIONS

The use of deep learning technologies on satellite images facilitates territory analysis for governmental and/or state-level decision-making. In this study, in addition to identifying fires, CNN facilitates the detection of urban areas vulnerable to forest fires which, in addition to compromising the ecosystem, can affect the population in a social, economic, and patrimonial way.

An early alert system would be built using CNN for advice to the gubernatorial institutions about wildfires that are more commonly affecting our planet due to climate change. With the

daily data from Planet Scope, the monitoring system would be detailed, constant, and accurate with the deep learning implementation.

With an accuracy of 85% it is possible to keep the community informed for the management and management of risks associated with natural phenomena.

REFERENCES

- [1] M. Schaefer, N. X. Thinh, y S. Greiving, «How Can Climate Resilience Be Measured and Visualized? Assessing a Vague Concept Using GIS-Based Fuzzy Logic», *Sustainability*, vol. 12, n.o 2, p. 635, ene. 2020, doi: 10.3390/su12020635.
- [2] R. R. Cordero et al., «Extreme fire weather in Chile driven by climate change and El Niño–Southern Oscillation (ENSO)», *Sci. Rep.*, vol. 14, n.o 1, p. 1974, ene. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-52481-x.
- [3] L. Vilà-Vilardell, W. S. Keeton, D. Thom, C. Gyeltshen, K. Tshering, y G. Gratzner, «Climate change effects on wildfire hazards in the wildland-urban-interface – Blue pine forests of Bhutan», *For. Ecol. Manag.*, vol. 461, p. 117927, abr. 2020, doi: 10.1016/j.foreco.2020.117927.
- [4] B. Leblon, J. San-Miguel-Ayanz, L. Bourgeau-Chavez, y M. Kong, «Remote Sensing of Wildfires», en *Land Surface Remote Sensing*, Elsevier, 2016, pp. 55-95. doi: 10.1016/B978-1-78548-105-5.50003-7.
- [5] S. M. B. Dos Santos, S. G. Duverger, A. Bento-Gonçalves, W. Franca-Rocha, A. Vieira, y G. Teixeira, «Remote Sensing Applications for Mapping Large Wildfires Based on Machine Learning and Time Series in Northwestern Portugal», *Fire*, vol. 6, n.o 2, p. 43, ene. 2023, doi: 10.3390/fire6020043.
- [6] Y. S. Can, P. J. Gerrits, y M. E. Kabadayi, «Automatic Detection of Road Types From the Third Military Mapping Survey of Austria-Hungary Historical Map Series With Deep Convolutional Neural Networks», *IEEE Access*, vol. 9, pp. 62847-62856, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3074897.
- [7] A. Abdollahi, B. Pradhan, N. Shukla, S. Chakraborty, y A. Alamri, «Deep Learning Approaches Applied to Remote Sensing Datasets for Road Extraction: A State-Of-The-Art Review», *Remote Sens.*, vol. 12, n.o 9, Art. n.o 9, ene. 2020, doi: 10.3390/rs12091444.
- [8] A. E. Maxwell, Odom, C. M. Shobe, D. H. Doctor, M. S. Bester, y O. Tobi, «Exploring the influence of input feature space on CNN-based geomorphic feature extraction from digital terrain data», *Earth Space Sci.*, vol. 10, n.o e2023EA002845, 2023, doi: <https://doi.org/10.1029/2023EA002845>.
- [9] D. Rashkovetsky, F. Mauracher, M. Langer, y M. Schmitt, «Wildfire Detection From Multisensor Satellite Imagery Using Deep Semantic Segmentation», *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 14, pp. 7001-7016, 2021, doi: 10.1109/JSTARS.2021.3093625.
- [10] D. Hamilton, W. Gibson, D. Harris, y C. McGath, «Evaluation of Multi-Spectral Band Efficacy for Mapping Wildland Fire Burn Severity from PlanetScope Imagery», *Remote Sens.*, vol. 15, n.o 21, p. 5196, oct. 2023, doi: 10.3390/rs15215196.
- [11] L. Yu, B. Li, y B. Jiao, «Research and Implementation of CNN Based on TensorFlow», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 490, p. 042022, abr. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/490/4/042022.
- [12] D. L. R. Charan, D. S. S. Teja, R. Subhashini, Y. B. Jinila, y G. M. Gandhi, «Convolutional Neural Network based Water Resource Monitoring Using Satellite Images», en *2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, Coimbatore, India: IEEE, jun. 2020, pp. 1261-1266. doi: 10.1109/ICCES48766.2020.9137920.
- [13] S. Bock y M. Weis, «A Proof of Local Convergence for the Adam Optimizer», en *2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Budapest, Hungary: IEEE, jul. 2019, pp. 1-8. doi: 10.1109/IJCNN.2019.8852239.
- [14] S. Y. Sen y N. Ozkurt, «Convolutional Neural Network Hyperparameter Tuning with Adam Optimizer for ECG Classification», en *2020 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, Istanbul, Turkey: IEEE, oct. 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/ASYU50717.2020.9259896.
- [15] T. Dhu et al., «National Open Data Cubes and Their Contribution to Country-Level Development Policies and Practices», *Data*, vol. 4, n.o 4, p. 144, nov. 2019, doi: 10.3390/data4040144.
- [16] X. Huang, B. Ziniti, N. Torbick, y M. Ducey, «Assessment of Forest above Ground Biomass Estimation Using Multi-Temporal C-band Sentinel-1 and

Polarimetric L-band PALSAR-2 Data», *Remote Sens.*, vol. 10, n.o 9, p. 1424, sep. 2018, doi: 10.3390/rs10091424.

[17] R. D. M. Scafutto, C. R. de Souza Filho, D. N. Riley, y W. J. de Oliveira, «Evaluation of thermal infrared hyperspectral imagery for the detection of onshore methane plumes: Significance for hydrocarbon exploration and monitoring», *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*, vol. 64, pp. 311-325, feb. 2018, doi: 10.1016/j.jag.2017.07.002.

Synthetic Accelerograms Using the Discrete Wavelet Transform.

Alejandro Mira Caro, Freddy Bolaños, and Juan F Velasquez

Abstract— This work presents an application based on the Discrete Wavelet Transform (DWT) for processing seismic signals. The application allows for the decomposition, filtering, and synthesis of signals, effectively eliminating noise and irrelevant components for simulations. This tool is crucial for the development of earthquake-resistant structures, as it enables more accurate simulations of earthquake effects. Additionally, the versatility of the application is demonstrated by its ability to process other types of signals, such as audio signals and image analysis, enhancing the understanding and simulation of various signals. The DWT offers a crucial advantage over the Fourier Transform by providing both frequency and temporal information, allowing for a better understanding of the temporal evolution of physical phenomena such as earthquakes. Moreover, the wavelet components computation is easier than in the case of the FFT, since it does not imply the use of complex values.

Palabras claves— Earthquakes, Filtering, Signals, Simulation, Wavelets

I. INTRODUCTION

THE exploration of new methods for signal processing is highly important today, as it allows to discover new ways to understand and utilize information. Traditionally, the Fast Fourier Transform (FFT) has been used to decompose signals into their frequency components. However, this approach has a significant limitation: by focusing solely on frequency, it loses temporal resolution, which is crucial for understanding the sequence of events in physical phenomena. Without the ability to decompose a signal over time, it can be difficult to obtain detailed information about the temporal evolution of a system, as in the case of an earthquake [1]. In the search for an alternative, the Wavelet transform emerges as a solution that allows signals to be decomposed in both time and frequency domains, overcoming the limitations of the Fourier transform. This feature is particularly useful in the analysis of seismic signals, where it is essential to capture both the temporal and frequency evolution to achieve an accurate simulation of the effects of such phenomena [2].

During the development of an application in collaboration with the Semillero de Instrumentación, Control y Robótica (SInCRo) at the Universidad Nacional de Colombia, a structured methodology was followed. This included understanding the decomposition of signals using the Discrete Wavelet Transform, developing an application in Matlab, selecting significant elements for signal reconstruction, eliminating noise, and simulating seismic effects. Additionally, regular meetings were held to evaluate and discuss progress, thus fostering interdisciplinary collaboration and systematic project assessment.

Alejandro Mira is the primary author. Freddy Bolaños and Juan F. Velasquez are co-authors who have contributed equally.

II. CONSTRUCTION OF THE APP FOR SYNTHETIC ACCELEROGRAMS

A. Signal Decomposition

In the process of signal decomposition, various variables are considered, including the signal frequency and the amount of data available. Special attention is also given to the selection of the Wavelet mother function, as this choice directly impacts the characteristics extracted from the signal. Choosing a specific Wavelet mother function provides the ability to more effectively represent particular frequencies or to compress the energy present in the signal. Figure 1 depicts some instances of well-known wavelet mother functions. Such instances are common in several applications in literature.

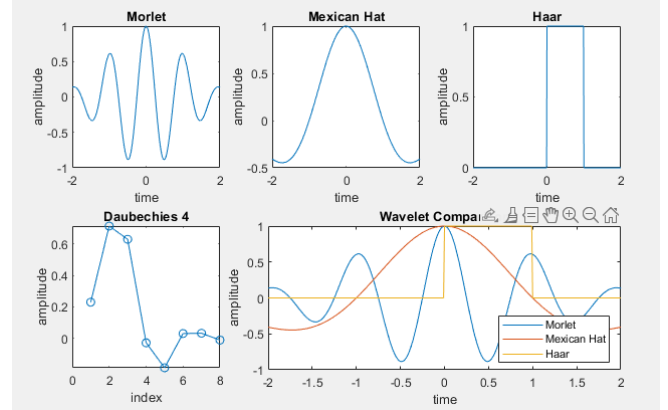


Fig. 1. Some instances of Wavelet mother functions

Next, we need to consider the number of levels at which we want to decompose the signal, as this affects the temporal and frequency resolution of the approximation and detail components. It is important to understand that the detail components contain high-frequency information, while the approximation component of the decomposition contains the low-frequency information of the signal, so it can be considered a smoothed version of the signal.

Alejandro Mira, Control Engineering student at the Universidad Nacional de Colombia – Medellín campus (e-mail: amira@unal.edu.co)

Freddy Bolaños, lecturer at the Department of Electrical and Automation Engineering, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia (e-mail: fbolanosm@unal.edu.co)

Juan F. Velasquez, Postgraduate student at the Universidad Nacional de Colombia – Medellín campus (e-mail: jfvelasq@unal.edu.co)

Upon decomposing the signal, with the desired level of detail and the chosen mother wavelet, we obtain a vector that contains all the information of the signal, differentiating the obtained components, as can be seen below.

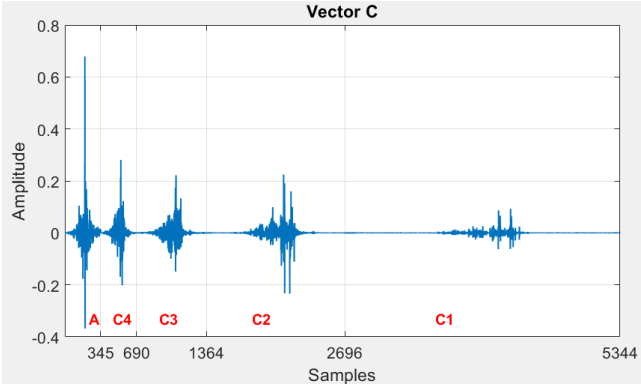


Fig. 2. Signal Components Vector.

This vector plays a crucial role in the selection of components to filter. It is important to highlight that each level of detail is half the length of the previous detail component, in accordance with the fundamental principles governing wavelet transform theory. This information is essential for understanding the hierarchical structure of the detail and approximation components, which facilitates effective manipulation of the signal during the decomposition and reconstruction process.

B. Selection and Filtering of Signal Components

For the selection of components to filter, an application was developed that allows for the choice of various parameters to manipulate the signal in real-time, thus obtaining the best results [3].

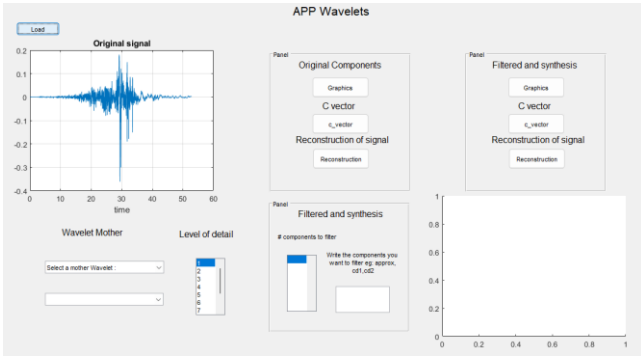


Fig. 3. APP wavelets.

In the developed application, we can select the number of components we wish to filter. Additionally, the app allows for the visualization of various graphs that provide valuable information for the filtering and synthesis of the signal.

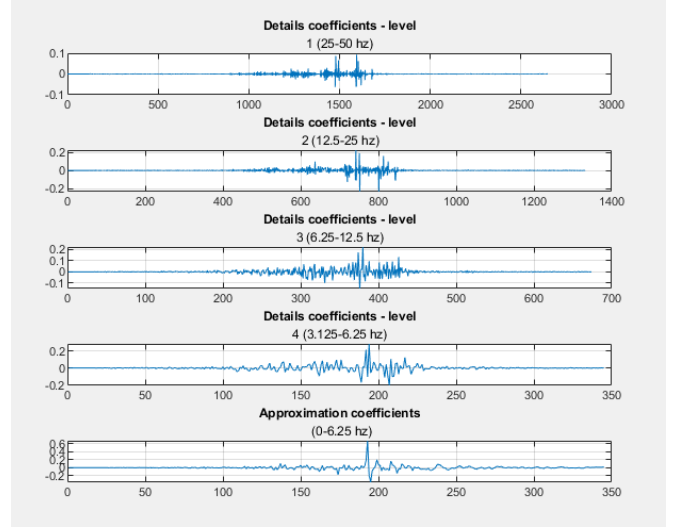


Fig. 4. Signal Components.

After selecting the components to filter, we will modify the component vector by setting the filtered components to zero, as shown below.

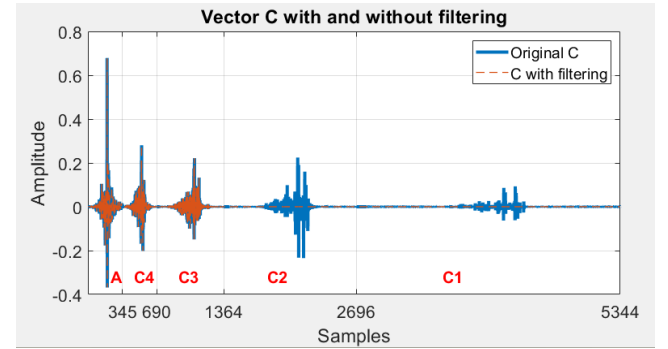


Fig. 5. Filtered Component Vector.

In the synthesis process, we will use the new component vector along with the mother wavelet employed during decomposition. The decision of which components to filter is based on the type of signal application, granting the expert the ability to adjust parameters in the application to select those components that best meet the specific requirements of their work. This approach provides flexibility and customization, allowing for precise adaptation to the particular needs of the signal application.

In the case of seismic signals, and as it happens with several electrical signals, the undesirable noise is associated to high frequency. Therefore, we generally select the initial components of the signal for filtering.

C. Signal Synthesis and Simulation

For signal synthesis, the reverse process of decomposition is performed, but using the filtered component vector. If necessary, the amplitude scale or temporal shift can be adjusted to achieve the desired synthesis.

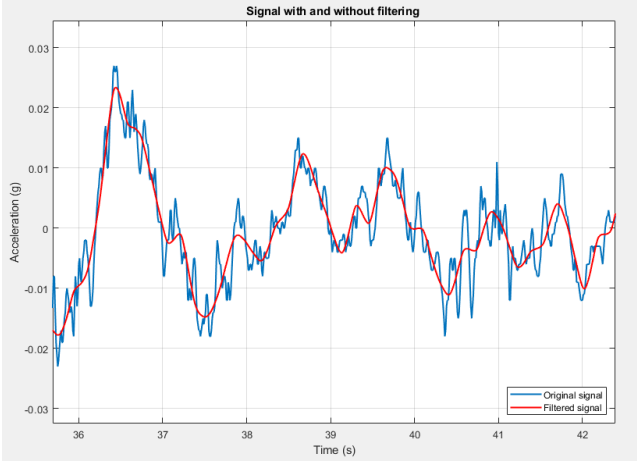


Fig. 6. Filtered Signal.

It is important to validate the results obtained by comparing them with the original signal. As shown in the previous image, appropriate filtering of high-frequency components was achieved, thus removing noise from the signal.

In the filtering and synthesis process, a seismic signal derived from the Chi-Chi earthquake, which occurred on September 21, 1999, in the central part of Taiwan, was used. In this analysis, we applied decomposition to the signal using the Coiflet mother wavelet (chosen for its compact support and its tendency to be smooth and highly regular), with a detail level of 6 components. After evaluating the various graphical representations provided by the application, the decision was made to filter 4 of these components, which contained high-frequency information. This approach allowed us to achieve the previously observed result.

III. EXPERIMENTAL RESULTS

In this context, the developed application will be used to analyze various types of signals, initially focusing on filtering seismic signals and, in the future, on signals related to household energy consumption. The primary reason for choosing seismic signals is their measurement nature, where captured signals contain harmonics of various frequencies [2]. These harmonics undergo a filtering process with the goal of adapting the application to a specific use case.

In the study of seismic phenomena, it is crucial to identify and isolate relevant frequencies, as during an earthquake, certain frequencies can play a determining role depending on the structure or building involved. Additionally, when simulating these signals on specialized machinery, high-frequency components can significantly impact the operation and performance of the equipment.

IV. CONCLUSIONS

This study confirms the effectiveness of the Discrete Wavelet Transform (DWT) in seismic signal processing, providing detailed decomposition as well as effective filtering and synthesis of signals. The process begins with the decomposition of the signal, where the choice of the mother wavelet and the number of decomposition levels are crucial factors for precise filtering [2]. The developed application allows for the effective selection and filtering of unwanted components, guiding the user through various graphs and results to optimize the filtering.

The DWT has proven to be effective in eliminating noise associated with accelerogram measurements and irrelevant components during simulation, significantly improving the accuracy of assessing seismic effects on earthquake-resistant structures. In the synthesis phase, the signal is reconstructed from the preserved components, ensuring that relevant information is retained for use in simulations.

In the analysis of seismic phenomena, identifying and isolating relevant frequencies is fundamental, as certain oscillations can be critical for evaluating the impact on different structures or buildings. The comparison with respect to the Fourier Transform highlights the significant advantage of the DWT in terms of temporal and frequency resolution, as well as its greater computational efficiency [1]. Furthermore, the study demonstrates the versatility of the DWT by applying it not only to seismic signals but also to other types of signals, such as electrical signals.

Experimental results, validated through the analysis of the Chi-Chi earthquake signal, confirm the effectiveness of high-frequency component filtering. The energy of the original and filtered signals was also evaluated [3], which is crucial for their subsequent use in earthquake simulators. These findings suggest that the application could be extended to other fields, such as energy consumption signal analysis, underscoring its potential for a variety of future applications. Overall, this study highlights the importance of the DWT in signal processing both in frequency and time domains, and its utility in the simulation and analysis of complex phenomena.

REFERENCES

- [1] Pereyra, Ward et al.: Harmonic Analysis from Fourier to Wavelets. Providence, RI, USA: American Mathematical Society, 2012, pp. 1-437.
- [2] Chen, Wang: "Seismic resolution enhancement by frequency-dependent wavelet scaling," IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., vol. 15, no. 5, pp. 654-658, May 2018, doi: 10.1109/LGRS.2018.2809564.
- [3] Zhao, Zhang: "ECWT-based method for extracting seismic velocity dispersion," IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., vol. 19, pp. 1-5, Jan. 2022, doi: 10.1109/LGRS.2021.3056610.

Uso de la Simulación de Monte Carlo en los estudios de mercado, para la determinación del costo óptimo de obra civil en una institución pública colombiana.

Giovany Suárez Pinilla², Universidad Nacional de Colombia

Resumen— Para realizar estudios de mercado con el fin de estimar el costo de obra civil en instituciones públicas en Colombia, el análisis estadístico emplea el valor promedio y la desviación estándar de los precios de oferentes. La presencia de valores extremos puede generar presupuestos con altos costos, debido al bajo número de ofertas que son presentadas. Esta investigación propone la aplicación del Método de Monte Carlo, modelando un gran número de ofertas, buscando establecer una distribución uniforme de precios para reducir el presupuesto final de obra. La herramienta es implementada en MS Excel, utilizando los precios de los ítems de construcción como variables de entrada y el costo óptimo de la obra como variable de salida.

Términos índice— Contratación Pública, Costo óptimo de Obra, Método de Monte Carlo, MS Excel

I. INTRODUCCIÓN

En una entidad pública, un procedimiento habitual para la determinación de los recursos que se van a destinar a una obra civil, es la realización de un estudio de mercado que -entre otros elementos- incluye la solicitud de cotizaciones a un grupo de oferentes externos a la institución, para cada una de las actividades -ítems- de construcción que se van a contratar (Departamento Administrativo de la Función Pública, 2019).

A los precios recolectados en las cotizaciones, se les realiza un análisis estadístico básico, que consiste en rechazar los precios -para cada ítem- que se encuentran por encima o por debajo de una desviación estándar ($\pm 1\sigma$) del promedio aritmético de todos los precios, incuyendo los que la entidad pública tiene en su base de datos y que se consideran ajustados a las condiciones vigentes en el mercado. Posteriormente, con los precios que no hayan sido rechazados en el paso anterior, se calcula (a) la media geométrica y (b) la mediana para cada ítem (Colombia Compra Eficiente, 2019). Con el menor valor entre (a) y (b), se determina el precio unitario por actividad y el monto presupuestal que destinará la entidad para la contratación de la obra (Agencia Nacional de Contratación Pública, 2017).

Si bien este procedimiento corriente de análisis es muy válido y obedece a un proceso lógico, tiene implícito un sesgo hacia

los valores altos, puesto que al tratarse de medidas de tendencia central (promedio aritmético y geométrico), el presupuesto final de obra se verá afectado por cotizaciones elevadas (Abdul-Rahman & Wang, 2017).

La solución propuesta para evitar la afectación de valores extremos y un número pequeño de ofertas, es la incorporación de una rutina de análisis estadístico-probabilístico a través del método simulación de Monte Carlo, basada en una distribución de probabilidad que será menos susceptible a los valores extremos (Demidenko, 2019) y a través de la cual, permita identificar aquellos precios exorbitantes que “disparan” el costo total de las obras (Gallego y otros, 2021). Esta rutina de análisis, estará inmersa en las hojas de cálculo MS Excel que emplean los servidores públicos encargados de los estudios de mercado.

II. METODOLOGÍA

El diseño metodológico de esta investigación se basó en una cuidadosa reflexión sobre la construcción de una matriz de congruencia que asegure la coherencia de los elementos vinculados a los estudios de mercado (Quispe & Villalta, 2020). La construcción de la siguiente matriz -Tabla I-, se sustenta en la hipótesis de la afectación del presupuesto final de obra civil debido a las altas cotizaciones presentadas por los oferentes en los estudios de mercado.

TABLA I
MATRIZ DE CONGRUENCIA PARA LA INVESTIGACIÓN.

Pregunta de investigación	Hipótesis	Objetivo general
¿Cómo integrar un procedimiento de revisión de precios bajo una metodología estadístico-probabilística, para determinar el costo óptimo de las obras de una manera más acorde a la dinámica real del mercado, a fin de promover el uso racional de los recursos públicos?	El monto presupuestal que destina una entidad pública a la realización de obra civil, se está viendo afectado por las cotizaciones elevadas que presentan los oferentes externos en los estudios de mercado previos a la licitación pública, por lo que la integración de un procedimiento de revisión de precios bajo una metodología estadístico-probabilística, podría ayudar a determinar un costo final más acorde a la dinámica del mercado y con ello promover el uso racional de los recursos públicos.	Crear e implementar un procedimiento de revisión de precios, basado en un análisis estadístico-probabilístico, que permita determinar un costo total de obra más acorde a la dinámica real del mercado y al uso racional de los recursos con que cuenta la entidad pública, con la finalidad de brindar eficiencia al proceso de toma de decisiones y optimizar el uso de los recursos públicos.

² Ingeniero y Magíster en Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia. Candidato a Doctor por la Universidad Benito Juárez. Docente de la Universidad Distrital FJC-Bogotá.

Es por esto, que el objetivo general de la investigación – creación e implementación de un nuevo procedimiento para el análisis de precios– está soportado en el marco normativo vigente de la contratación pública en Colombia, la evaluación del potencial sobrecosto en que se estaría incurriendo en el proceso actual de revisión y, finalmente, en el análisis estadístico-probabilístico basado en la simulación de Monte Carlo, mediante la generación de un número significativamente mayor de ofertas que las que se presentan regularmente en los estudios de mercado, modelación que se ha empleado exitosamente en otras áreas de la ingeniería y la administración pública (Inquilla & Limachi, 2019; Steenbergen y otros, 2014; Anderson, 2019 y Barrera, 2019, entre tantos otros).

De este modo, basados en el objetivo general que se persigue, se establecen los siguientes objetivos específicos con sus correspondientes variables de estudio -Tabla II-.

TABLA II
OBJETIVOS Y VARIABLES PARA LA INVESTIGACIÓN.

1. Revisar el marco normativo que rige la contratación pública que aplica en los estudios de mercado, que se realizan para determinar el presupuesto destinado a obra civil	Marco normativo vigente en los procesos de contratación al interior de la Institución
2. Evaluar el sobrecosto de obra civil, en que potencialmente estarían incurriendo los estudios de mercado actuales, que se llevan a cabo para la determinación del presupuesto adjudicado por la entidad pública para tal fin	El potencial sobrecosto de obra civil en que estarían incurriendo los estudios de mercado
3. Implementar un módulo de análisis estadístico-probabilístico de precios en las hojas de cálculo empleadas en los análisis de estudio de mercado, que permita identificar y dar tratamiento a los precios exorbitantes que se presentan en las cotizaciones enviadas por externos a la entidad pública.	Modelo de análisis estadístico-probabilístico de precios

A través de un enfoque hipotético-deductivo, adaptado de una investigación seguida por Mertens & Recker (2023) a un robusto sistema de información empresarial, se siguieron las siguientes etapas que condujeron al esablecimiento de un análisis de precios basado en la simulación de Monte Carlo:

- Consulta exhaustiva de la normatividad vigente para la

contratación en procesos públicos

- Observación, a partir de la información recopilada y de la opinión de algunos expertos involucrados en el proceso, de incrementos sustanciales en el presupuesto destinado a obra civil, debido a las altas cotizaciones presentadas en los estudios de mercado.
- Consecución de los estudios de mercado, dentro de la institución pública, objeto de estudio
- Revisión de la estadística descriptiva en el modelo de precios vigente
- Aplicación de simulación de Monte Carlo y diseño en hoja MS Excel de la rutina para el análisis probabilístico propuesto.
- Estimación porcentual del potencial sobrecosto

Tamaño de la muestra

En una institución educativa de educación superior, con once facultades y más de una docena de institutos y unidades administrativas que realizan diariamente procesos de contratación, se torna prácticamente inviable abordar y conocer todos los elementos contractuales de cada uno de estos procesos; por tal razón, se tomarán en cuenta únicamente algunos de los contratos que superen los 80 salarios mínimos mensuales legales vigentes (SMMLV), que en 2024 están cerca de los 2,700 dólares (D.R.E., 2008). En consecuencia, la muestra corresponderá a los cuatro 4) estudios de mercado de orden superior a los que se obtuvo acceso en la institución estudiada

Se trabajó con un nivel de confianza de 80%, y se tuvo en cuenta el punto de vista de los expertos consultados sobre asuntos de contratación oficial, que sugieren que el sobrecosto de obra civil en que se está incurriendo hoy día es cercano al 20%. De acuerdo con este estimativo, considerándolo como la variación máxima para los costos de obra (3σ), se tiene una desviación estándar de $\sigma = 20/3 = 6.67\%$. Con fines prácticos, se asumirá un error admisible máximo de $\epsilon = 3\%$, un valor común empleado en la ingeniería civil para diversos casos de estudio (Suárez P., 2017).

A partir de los considerandos anteriores, se llega finalmente al tamaño de muestra para una variable aleatoria continua, donde **no** se conoce el tamaño de la población:

$$n = \frac{z^2 \cdot \sigma^2}{\epsilon^2} = \frac{1.282^2 \cdot 6.67^2}{3^2}$$

$$n' = 10.124 \approx 11$$

Para los cuatro (4) estudios, $n_{total} = 4 * n' = 44$

De este modo, para cada estudio de mercado analizado, se tendrán en cuenta los primeros once (11) ítems, escalados de mayor valor a menor valor, para obtener un tamaño de muestra de 44 precios. No obstante, dado que el valor total de costo directo es tan relevante para quienes analizan y toman

decisiones acerca de los estudios de mercado llevados a cabo, se adicionan a la muestra anterior los cuatro costos totales directos, para un **tamaño de muestra definitivo de 48 precios**.

III. RESULTADOS

A. Realización de la Simulación de Monte Carlo

Para los 48 ítems que conforman la muestra que se determinó previamente, en el intervalo de promedio $\pm 1\sigma$, se generan 5,000 precios aleatorios (Figura 1). Esta elección para el número de iteraciones no es al azar, puesto que en una investigación previa, este autor confirmó que para este número se estabiliza el comportamiento de la variación estándar (Suárez P., 2017). Esto, garantiza que la distribución de los precios “ofertados” para cada ítems sea uniforme, conforme se muestra en la Figura 2. Para la construcción de esta gráfica, las cinco mil iteraciones se agruparon en diez intervalos en cada uno de los casos contemplados.

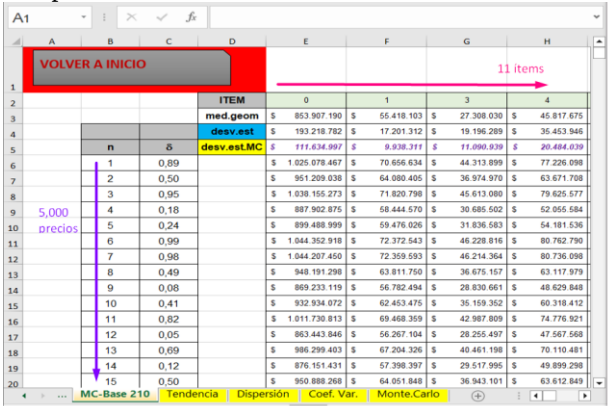


Fig. 1: Realización de simulación de Monte Carlo

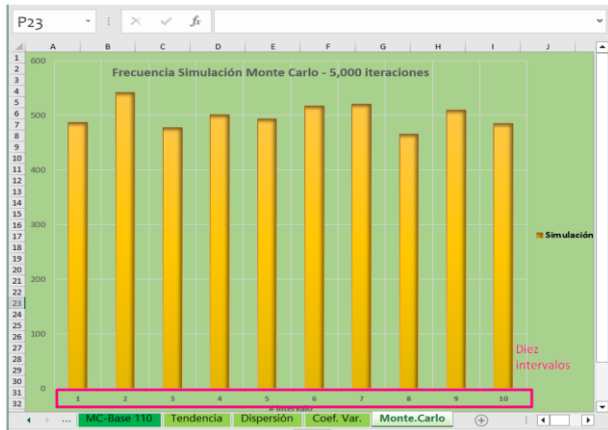


Fig. 2: Distribución uniforme de precios

B. Variación de precios en método actual vs método propuesto

En el momento en que se han modelado 5,000 precios para cada ítem de construcción, se procede a calcular el coeficiente de variación para cada uno de ellos; es entonces cuando se compara la variación presentada en el modelo actual de estudio de mercado y el propuesto mediante la generación aleatoria de

precios, como técnica eficiente para evitar los sesgos ante la presencia de un número limitado de ofertas (Ji y otros, 2022; Wang y otros, 2024). Se muestran los valores obtenidos para uno de los estudios de mercado suministrados por la institución pública, en la Figura 3.

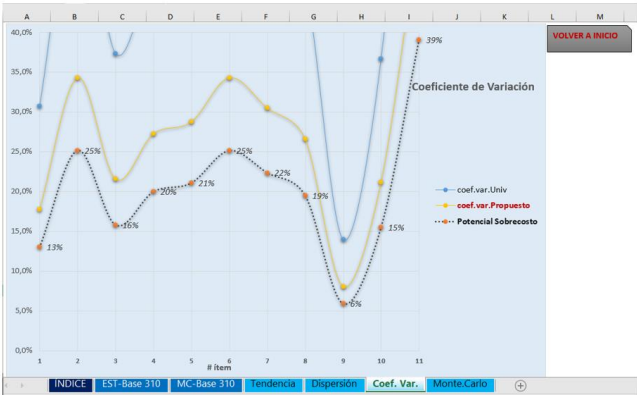


Fig. 3: Variación de precios: modelo actual vs propuesta

C. Estimación de potencial sobrecosto

Dado que se tiene un valor comparativo entre el rango de variación de los precios -mediante el coeficiente de variación- para las dos metodologías que se están comparando -la actualmente usada por la institución pública y la propuesta mediante Monte Carlo- es posible ahora estimar un potencial sobrecosto de obra civil, en términos porcentuales (Figura 4) y en términos absolutos (en miles de pesos colombiano, Figura 5).

Estudio	COEF VAR MC	COEF VAR UNIV	POTENCIAL sobrecosto	Precio Presupuesto oficial
Estudio 20	13,1%	22,6%	9,6%	\$ 702,1
Estudio 10	6,4%	11,2%	4,8%	\$ 391,4
Estudio 40	12,1%	21,1%	8,9%	\$ 192,1
Estudio 30	15,9%	27,6%	11,7%	\$ 158,2
Estudio 30	17,7%	30,7%	13,0%	\$ 100,0
Estudio 20	17,9%	31,0%	13,1%	\$ 42,1
Estudio 20	40,6%	70,3%	29,7%	\$ 36,2
Estudio 20	44,7%	77,4%	32,7%	\$ 21,9
Estudio 40	53,6%	93,1%	39,5%	\$ 20,9
Estudio 20	34,3%	59,4%	25,1%	\$ 18,6
Estudio 20	20,5%	35,5%	15,0%	\$ 17,0
Estudio 30	34,3%	59,4%	25,1%	\$ 16,5
Estudio 20	33,8%	58,6%	24,7%	\$ 15,6

Fig. 4: Potencial sobrecosto en proyectos de obra civil [%]



Fig. 5: Potencial sobrecosto en unidades monetarias [COP]

Por medio de métodos estadísticos muy bien definidos, como son los intervalos de confianza para muestra grande y pequeña y la simulación de Monte Carlo -con 5,000 iteraciones para cada estudio de mercado analizado-, se hizo una estimación porcentual del potencial sobre costo que se estaría alcanzando al continuar con el procedimiento actual de evaluación precios en la institución: en razón al orden de magnitud de los ítems contratados, se puede hacer una aproximación del monto de dinero en que podría disminuirse el costo total de una obra civil que se vaya a contratar.

La investigación ha delineado un enfoque innovador y necesario para mejorar la eficiencia en la gestión de proyectos de obra civil pública en Colombia. Al superar las limitaciones inherentes al análisis estadístico convencional, el uso del método de Monte Carlo respaldado por el marco normativo de contratación pública ha demostrado ser una alternativa robusta y eficaz. La capacidad de modelar un conjunto más amplio de ofertas y establecer una distribución uniforme de los datos ha permitido mitigar los sesgos causados por valores extremos, resultando en presupuestos finales más realistas y optimizados.

La implementación de la herramienta desarrollada en MS Excel ofrece a las entidades interesadas una solución práctica y accesible. La rutina de cálculos proporciona una estimación porcentual de posibles sobre costos para cada ítem evaluado, empoderando a los responsables de la toma de decisiones con información precisa y detallada. Este enfoque estadístico-probabilístico no solo contribuye a la transparencia en los procesos de contratación pública, sino que también promueve una asignación más eficiente de recursos, fomentando el desarrollo sostenible y la ejecución exitosa de proyectos de infraestructura.

La modernización del Estado, en todos sus procesos y dimensiones, obliga la implementación, uso y difusión de las nuevas tecnologías para que su funcionamiento sea cada vez más eficiente en cuanto a criterios de tiempo, costos y uso óptimo de los recursos públicos. En esa dirección, la función administrativa no puede ser ajena a los métodos cuantitativos que las disciplinas exactas han dispuesto para el desarrollo de la ciencia y la tecnología. Por tal razón, de una manera sencilla y secuencial, este trabajo propone el uso de herramientas estadísticas muy concretas que permiten un manejo de las variables aleatorias implícitas en los estudios de mercado, para apoyar la toma de decisiones en cuanto al costo total que destina una entidad pública a la construcción de obras civiles.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer a la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, en especial a las dependencias de Dirección de Bienestar, Dirección de Ordenamiento y División de Personal Administrativo, junto con el Profesor PhD Óscar Oliveros Garay y Profesora PhD Yuly Edith Sánchez Mendoza, por respaldar mi participación en este proyecto de investigación desde sus inicios hasta sus instancias finales.

- Abdul-Rahman, H., & Wang, C. (2017). Monte Carlo simulation and risk assessment in construction projects. *Risk Management in Engineering Projects*, 131-154.
- Agencia Nacional de Contratación Pública. (5 de 03 de 2017). Colombia Compra Eficiente. <https://www.colombiacompra.gov.co/manuales-guias-y-pliegos-tipo/manuales-y-guias>
- Anderson, I. F. (2019). Aplicación estadístico-probabilística al concepto estético-filosófico de lo bello en el diseño industrial. *ArtyHum Revista de Artes y Humanidades*(60), 55-79.
- Barrera D., M. H. (2019). La modelación como método del conocimiento científico en las ciencias sociales. *RELMECS, Centro Interdisciplinario de Metodología de las Ciencias Sociales*, 1-14.
- Colombia Compra Eficiente. (2019). Guía para la Elaboración de estudios de Sector. Bogotá, Colombia: Departamento Administrativo de la Función Pública.
- Demidenko, E. (2019). *Advanced Statistics with Applications in R*. New York: Wiley.
- Departamento Administrativo de la Función Pública. (7 de 10 de 2019). Decreto 1822 de 2019. Bogotá, Colombia.
- Dirección de Relaciones Exteriores (D.R.E.). (22 de 12 de 2008). Universidad Nacional de Colombia - Manual de Convenios y Contratos.
- Gallego, J., Rivero, G., & Martínez, J. (2021). Preventing rather than punishing: An early warning model of malfeasance in public procurement. *International Journal of Forecasting*, 37(1), 360-377.
- Inquilla-Mamani, J., & Limachi, O. (2019). Análisis de riesgo mediante el método de simulación de Montecarlo aplicado a la inversión pública en el sector educativo peruano: el caso del departamento de Puno. *Praxis*, 15(2), 163-176.
- Ji, C., Su, X., Qin, Z., & Nawaz, A. (2022). Probability analysis of construction risk based on noisy-or gate bayesian networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 217(107974).
- Mertens, W., & Recker, J. (2023). New Guidelines for Null Hypothesis Significance Testing in Hypothetico-Deductive IS Research. En *Advancing Information Systems Theories, Volume II* (págs. 385-437). Cham: Springer International Publishing.
- Quispe, T., & Villalta, L. (2020). Epistemología e investigación cuantitativa. *IGOVERNANZA*, 3(12), 107-120.
- Steenbergen, R., Miraglia, S., Vrouwenvelder, A., & van Gelder, P. (2014). *Safety, Reliability and Risk Analysis*. London, UK: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Suárez P., J. G. (2017). Análisis por confiabilidad de asentamientos de cimientos superficiales. Bogotá: Tesis MSc Universidad Nacional de Colombia.
- Wang, S., Hasan, M., & Lu, M. (2024). Global sensitivity analysis methodology for construction simulation models: multiple linear regressions versus multilayer perceptions. *Journal of Construction Engineering and Management*, 150(5), 04024035.

Optimización del proceso productivo de sistemas de iniciación: Una revisión de la literatura

Daniela Bocanegra Florián, Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Eduyn Ramiro Lopez Santana, Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Resumen — La optimización de procesos productivos en general contribuye a analizar los procesos con la finalidad de eliminar posibles errores y, lo más importante, hacer que estos sean más eficientes y eficaces, es por ello por lo que autores como (Lange, 2004) manifiestan que la optimización es de dimensión finita y ocurre en todas las ciencias matemáticas. La mayoría de estos problemas no se pueden resolver analíticamente. Para el proyecto de investigación, se busca resolver el problema de optimización, centrado en la planificación de la producción incluyendo la capacidad de almacenamiento de la cadena de suministro teniendo en cuenta los costos de producción y logísticos asociados, con el fin de dar cumplimiento al plan operativo de la organización y cumplir la satisfacción de la demanda del cliente.

La revisión de la literatura para el proyecto de optimización del proceso productivo de sistemas de iniciación se realizó en las bases de datos científicas de Scopus, así como en libros de la temática específica del caso de estudio. Se emplearon las palabras clave en español: multiobjetivo, modelo, optimización, producción, proceso, industria, cadena de suministro, modelo matemático, simulación y programación. Se realizó análisis de la información obtenida mediante Vos Viewer y análisis propio de Scopus.

Palabras clave: Planificación, Sistema Logístico, Cadena de abastecimiento, Listado de recursos, Capacidad de planeación, Planificación de requerimientos de capacidad

Keywords: Scheduling, Logistics Systems, Supply Chain, Bill of resources, Capacity Planning, Capacity Requirements Planning (CRP)

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la mayoría de las organizaciones han repensado y redefinido el concepto de gestión de operaciones facilitando el uso de la denominada cadena de suministro (SC) mediante la incorporación de socios upstream (input) y downstream (output), esto lo manifestaron los autores (Brandenburg, Govindan, & Sarkis, 2014) citando a (Bettley & Burnley, 2008). La cadena de suministros SCM se ha definido como el flujo de factores físicos, lógicos y financieros, y se orienta a la planificación, el abastecimiento, la producción y la logística de distribución (Council, S. C., 2008) y aunque su enfoque es directo no se centra solamente en esas temáticas. Es allí, cuando se desprenden ciertas finalidades como la SSCM cuyo enfoque es principalmente en ámbitos sostenibles y sociales. Los autores (Brandenburg, Govindan, & Sarkis, 2014), presentan una descripción de la literatura en el marco de los modelos matemáticos basados en las cadenas SSCM, donde las empresas denominan los actores de análisis, los transportistas, distribuidores y los minoristas, completando la cadena de suministros; los modelos revisados por los autores apoyan los procesos de planificación de la producción, los procesos de abastecimiento, de transformación en gran medida.

La revisión de la literatura para el proyecto de optimización del proceso productivo de sistemas de iniciación se realizó en las bases de datos científicas de Scopus, así como en libros de la temática específica del caso de estudio. Se emplearon las palabras clave en español: multiobjetivo, modelo, optimización, producción, proceso, industria, cadena de suministro, modelo matemático, simulación y programación. Se encontraron artículos, artículos de revisión, libros, capítulos de libros, documentos de sesión y encuestas cortas. Para el área específica de búsqueda del caso de estudio se emplearon las palabras clave en español: multiobjetivo, optimización, producción y explosivos. Para las cuales se encontraron artículos, artículos de revisión, libros, capítulos de libros y documentos de sesión.

II. MARCO REFERENCIAL

La revisión de la literatura para el proyecto de optimización del proceso productivo de sistemas de iniciación se realizó en las bases de datos científicas de Scopus, así como en libros de la temática específica del caso de estudio. Se emplearon las palabras clave en español: multiobjetivo, modelo, optimización, producción, proceso, industria, cadena de suministro, modelo matemático, simulación y programación. Se encontraron artículos, artículos de revisión, libros, capítulos de libros, documentos de sesión y encuestas cortas. Para el área específica de búsqueda del caso de estudio se emplearon las palabras clave en español: multiobjetivo, optimización, producción y explosivos. Para las cuales se encontraron artículos, artículos de revisión, libros, capítulos de libros y documentos de sesión.

Con la información obtenida se buscará tener un enfoque del problema de investigación y como ha sido abordado en diferentes áreas del conocimiento y su aplicación en diferentes tipos de industrias. Se planteó encontrar al menos 50 documentos que favorezcan la investigación y ayuden a la propuesta del modelo multiobjetivo para conocer aquellos factores que impactan la optimización de los procesos productivos para la fabricación de detonadores no eléctricos, eléctricos y electrónicos. Las fases de investigación y selección de información, inicia con la búsqueda de información, continuando con la clasificación de los documentos encontrados de acuerdo con las diferentes áreas del conocimiento, donde se tendrá en cuenta los apartados más significativos y que contribuyan a la investigación; también se seleccionaran según el tipo de documento (artículo, artículo de revisión, papers de conferencias, etc.), el año de publicación también será un factor importante de análisis y los sectores a los cuales aplico la investigación y que puedan llegar a tener similitud con el caso de estudio. Para culminar los documentos seleccionados se clasificarán según el problema de investigación del proyecto y las mejores metodologías para la optimización de procesos productivos.

A continuación, se detalla la revisión de la literatura realizada para el proyecto de optimización del proceso productivo de sistemas de iniciación (detonadores no eléctricos, detonadores eléctricos y electrónicos), de acuerdo con la búsqueda inicial del problema de investigación y específica del caso de estudio.

Para abordar el problema de investigación de optimización del proceso productivo de sistemas de iniciación, se tuvo en cuenta la siguiente ecuación de búsqueda.

- **Ecuación de búsqueda 1:** multiobjective AND model AND optimization AND production AND process AND industry AND supply AND chain AND mathematical AND model AND simulation AND scheduling

Como resultado de la ecuación de búsqueda 1, se obtiene un total de 1385 documentos encontrados, al cerrar el horizonte de búsqueda entre los años 2013 al 2023 se obtienen 1251 documentos, realizando una exclusión de áreas se obtienen 1144 documentos, de los cuales 1014 son artículos, artículos de revisión y papers, con 165 documentos de artículos de revisión.

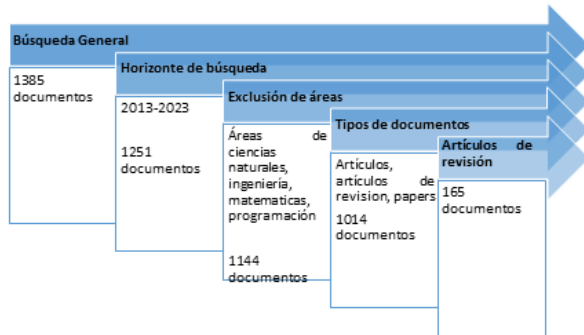


Fig. 1. Resultados Ecuación de búsqueda 1 en Scopus.

- **Ecuación de búsqueda 2:** multiobjective AND optimization AND production AND explosives

Como resultado de la ecuación de búsqueda 2, se obtiene un total de 315 documentos encontrados, al cerrar el horizonte de búsqueda entre los años 2013 al 2023 se obtienen 277 documentos, realizando una exclusión de áreas se obtienen 261 documentos, de los cuales 238 son artículos, artículos de revisión y papers, con 21 documentos de artículos de revisión.

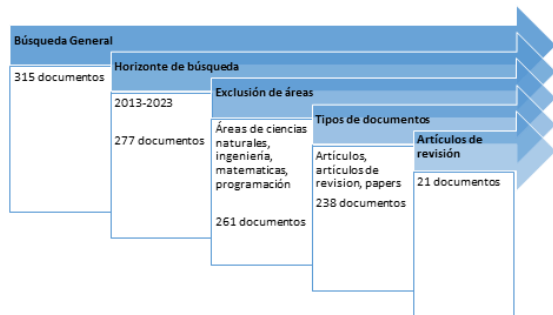


Fig. 2. Resultados Ecuación de búsqueda 2 en Scopus.

De acuerdo con los resultados obtenidos en Scopus, se procedió a realizar un análisis de la información obtenida mediante las dos ecuaciones de búsqueda en VOSviewer. En la figura presentadas a continuación, se muestra la correlación de las áreas del conocimiento y su aplicación en la literatura científica, con ello se pretende determinar los documentos claves según los clusters generados para la optimización de procesos productivos de explosivos y la implementación de modelos multiobjetivos.

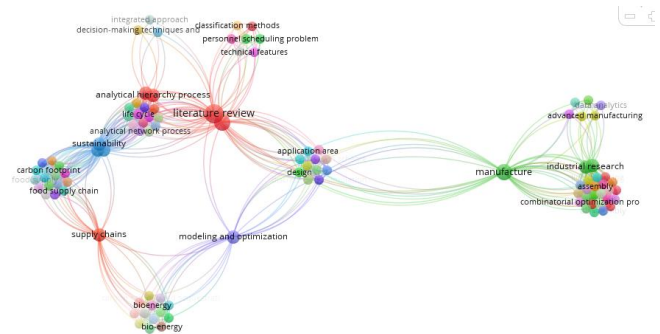


Fig.3. Análisis en VOSviewer Ecuación de búsqueda 1 problema de investigación.

Para la ecuación de búsqueda 1, se realiza una segunda fase de filtros con el fin de limitar la información de interés para el desarrollo de la investigación filtrando los documentos en inglés para un total de 1.100 documentos, luego al hacer un filtro de acuerdo a palabras claves (Optimization, Multiobjective Optimization, Scheduling, Manufacture, Manufacturing Process, Multiobjective programming, Scheduling problem, Simulation optimization, Supply chain desing, optimal systems, Production planning, Scheduling algorithms), las cuales fueran relevantes para el desarrollo de la presente investigación, se obtuvo un total de 549 documentos.

Se continua con una fase 3 para la ecuación de búsqueda 1, excluyendo las áreas menos representativas con la obtención de 499 documentos; en esta misma fase, se trata de limitar un poco más la búsqueda y disminuir el horizonte de tiempo de los años de búsqueda, por tanto, se toma en cuenta los años (2018-2023), con el filtro mencionado se obtienen 380 documentos. En la fase 4, de los 380 documentos obtenidos tras la aplicación de los filtros antes mencionados, se seleccionó una muestra de 60 documentos con base en el nivel de relevancia (los 50 primeros sugeridos por Scopus) y de citación (los 10 más citados en Scopus y que además no estuvieron en los 50 relevantes). A continuación, se presenta los resultados obtenidos para la muestra de 60 artículos.

Así las cosas, se propone priorizar la muestra de documentos obtenidos de acuerdo con las áreas del conocimiento (Multiobjective optimization, Scheduling, Optimization, Supply chain, Multi objective, Production planning) y revisar la correlación según el análisis en Scopus, de la siguiente forma:

TABLA I
ANÁLISIS Y PRIORIZACIÓN DE LA MUESTRA - DOCUMENTOS RELEVANTES

PRIORIZACIÓN PALABRAS CLAVE - Documentos de mayor relevancia							
PALABRA CLAVE	Multiobjective optimization	Scheduling	Optimization	Supply chain	Multi objective	Production planning	Correlación
Multiobjective optimization		1	1	1	1	1	5
Scheduling	1		1		1		3
Optimization	1	1		1			3
Supply chain	1		1		1	1	4
Multi objective	1	1					2
Production planning	1			1			2

Al igual que los documentos relevantes, para los documentos más citados, se propone priorizar la muestra de documentos obtenidos de acuerdo con las áreas del conocimiento (Optimization, Supply chain management, Supply chains, Learning systems, Stochastic models, Decisión making, Sustainability, Manufacture, Control optimization, Schedulling) y revisar la correlación según el análisis en Scopus, de la siguiente forma:

TABLA II
ANÁLISIS Y PRIORIZACIÓN DE LA MUESTRA - DOCUMENTOS MAS CITADOS

PRIORIZACIÓN PALABRAS CLAVE - Documentos de más citados										
PALABRA CLAVE	Optimization	Supply chain management	Supply chains	Learning systems	Stochastic models	Decisión making	Sustainability	Manufacture	Control optimization	Schedulling
Optimization										0
Supply chain management						1	1			2
Supply chains						1				1
Learning systems			1			1		1	1	4
Stochastic models						1				2
Decisión making		1	1	1	1			1	1	7
Sustainability		1								1
Manufacture	1	1	1	1	1	1			1	8
Control optimization				1				1		2
Schedulling	1					1				2

III. OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS PRODUCTIVOS Y MODELOS MULTIOBJETIVO APLICADOS

La mayoría de las organizaciones laboran con entornos bajo incertidumbre, a causa de la oferta y la demanda del mercado, allí es importante mencionar factores como los costos, los tiempos de entrega y la satisfacción de los clientes. Muchos autores han manifestado en sus investigaciones que la aparición de nuevas metodologías y tecnologías han facilitado la reducción de la incertidumbre dado que se puede llegar a predecir el comportamiento de los sistemas productivos. El internet de las cosas IoT, el aprendizaje automático, la cadena de bloques y otros avances tecnológicos han sido utilizados para la toma de decisiones. (Cavalcante, Frazzon, Forcellini, & Ivanov, 2019) citando a (Gao, Simchi-Levi, Teo, & Yan, 2019). La selección de proveedores para la cadena de suministro de una organización a lo largo de la historia ha tenido varios enfoques, y juega un papel decisivo para que las operaciones de un proceso productivo sigan su curso y no se vean interrumpidas. Cabe resaltar que los términos calidad, oportunidad, relaciones, entrega, servicio y tecnología hacen parte de los principales criterios para una buena selección de proveedores, según lo manifestó (Che, Chih-Ying, & Wee, 2016), donde se agrupan 11 términos para dicha selección. Así, la investigación de los autores (Cavalcante, Frazzon, Forcellini, & Ivanov, 2019) busca vincularla y cuantificar la confiabilidad de la entrega y como mediante un enfoque híbrido mediante simulación y técnicas de Sistema de marco lógico - SML se puede llegar a realizar una capacidad de análisis de datos para evaluar proveedores.

Y es que lo mencionado anteriormente favorece la optimización de los procesos productivos, donde una buena planificación de la producción depende de la disponibilidad de los recursos. La planificación y programación de talleres productivos ha sido abordado mediante técnicas de regresión

lineal (RL), donde se identifican parámetros y entornos de programación dinámicos particulares. Varios autores como (Stricker, Kuhnle, Sturm, & Friess, 2018) & (Waschneck, Reichstaller, Belzner, & Alte, 2018), han abordado para los problemas de Job Shop Scheduling Problem (JSSP) la regresión lineal (RL), desarrollando algoritmos de distribución de las ordenes de trabajo basadas en reglas existentes, igualmente se ha puesto a prueba como la simulación puede llegar a predecir el comportamiento de los sistemas productivos, y como se alcanza a generar un nivel de conocimiento mediante aprendizaje de acuerdo con la simulación realizada vinculada a las regresiones lineales. Todas estas estrategias han sido un punto de partida para establecer los precios del mercado, la aceptación de pedidos en la planificación de la producción, y se ha llegado hablar de que mediante estas técnicas se puede llegar a predecir la demanda del mercado mediante modelos de simulación de eventos discretos.

Muchos estudios clasifican la optimización en dos términos, una basada en derivados (DBO) y la optimización sin derivados (DFO). DBO puede ser un buen enfoque si se conoce con precisión la información del gradiente. Sin embargo, en el caso de un campo de ingeniería donde la función subyacente es compleja, obtener información de gradiente es difícil y la confiabilidad es pobre (Cho, y otros, 2023) citando a Moré y Wild, 2009). Los autores plantean la optimización bayesiana multiobjetivo, donde la eficiencia es mayor ya que la evaluación del número de funciones es mayor y utiliza conocimiento basado en datos, planteando funciones objetivas complejas (por ejemplo, multimodales, no convexas) sin conocimiento analítico sobre el sistema objetivo. Este tipo de optimización bayesiana los autores (Cho, y otros, 2023), manifiestan que favorece la solución de problemas de optimización de caja negra. El modelo de optimización multiobjetivo planteado por (Cancan, Bo, Chao, Zhicheng, & Lin, 2019), explica los beneficios de la reducción de riesgos asociadas a las medidas preventivas implementadas, dicho modelo supone un área objetivo y unos detectores, considerando entre la inversión detallada por los insumos y el efecto de la reducción de riesgos a lo que denominaron resultados donde se establece una minimización de estos valores. Para la solución de este modelo, se plantea resolver el modelo multiobjetivo según el número de detectores p, primero emplee las conocidas técnicas MILP para minimizar el CDP y luego calcule el CBR. Posterior a ello se utiliza un enfoque metaheurístico para resolver problemas de optimización multiobjetivo.

IV. SISTEMAS DE INICIACIÓN (DETONADORES)

Un sistema de iniciación es una combinación de accesorios y componentes explosivos que están diseñados para transmitir una señal e iniciar una carga explosiva, desde una distancia prudente, se denomina así a los dispositivos detonadores. (Atlas Powder Company, 1987) Los sistemas de iniciación contienen dispositivos destinados a detonar, estos deben tratarse con sumo cuidado y precaución, este tipo de dispositivos pueden emplearse para para iniciar explosivos de

gran potencia; estos sistemas se caracterizan por ser de tipo eléctricos y manejar frecuencias de energía y electricidad, según el tipo.

Un detonador es un dispositivo iniciador usado para activar (explosionar) cargas explosivas, materiales y dispositivos explosivos. Pueden ser tipo eléctrico, no eléctrico, electrónicos; las diferencias se encuentran en los mecanismos de activación, su seguridad, precisión y exactitud. A continuación, se describe la línea de evolución de sistemas de iniciación (detonadores) en las últimas décadas, es conveniente conocerlos dentro del contexto actual del mercado de detonadores en Colombia.

- Tipo pirotécnicos: común (fuse), eléctrico, tubo de coque (no eléctrico)
- Tipo Electrónicos: Electrónicos, inalámbricos.

Los detonadores no eléctricos, eléctricos y electrónicos en su mayoría, son ensamblados por personal especializado, mediante el uso de máquinas fijadoras neumáticas, garantizando con ello la hermeticidad de los fulminantes, muchos de ellos están compuestos por una cápsula cilíndrica de aluminio, que contiene una carga explosiva brizante, una gota eléctrica, un circuito electrónico y dos conductores de energía. Depende de cada tipo de detonador su composición química y la cantidad de explosivo contenido en él.

En Colombia el uso de explosivos esta direccionado a los sectores de defensa, seguridad, minería, infraestructura vial y construcción. La industria minera es un negocio que se basa en agregarle valor económico a los recursos naturales del subsuelo, tales como los minerales metálicos y no metálicos, las piedras preciosas y el petróleo; dando como resultado una serie de actividades iniciando con el proceso de extracción del material, seguido los de transformación en un producto derivado o beneficio del mineral y su comercialización. (Ministerio de Minas y Energía, 2022)

Los detonadores eléctricos a diferencia de los electrónicos, la conexión directa de los cables a la cabeza de fósforo o al cable puente los hace susceptibles a la iniciación por estática, corriente parásita o energía de radiofrecuencia. Por otro lado, los cables conductores del detonador electrónico no se conectan directamente a una cabeza de fósforo o cable puente, mientras que en los electrónicos sí. Los detonadores electrónicos por lo general tienen protección incorporada para no dañarse con el pulso electromagnético (EMP por sus siglas en inglés); mientras que los detonares eléctricos suelen dañarse con este tipo de energía. (Torres, 2021).

V. CARACTERIZACIÓN PROCESO PRODUCTIVO SISTEMAS DE INICIACIÓN (CASO DE ESTUDIO)

Con el fin de evaluar la propuesta del modelo multiobjetivo del proyecto, se tomará como caso de estudio la empresa colombiana perteneciente al sector defensa del estado nacional que, por mandato constitucional, es la única entidad encargada de fabricar y comercializar armas, municiones, explosivos y accesorios de voladuras en el país.

Empresa: Industria Militar – Fabrica de Explosivos Antonio Ricaurte

Descripción de la organización: Empresa colombiana perteneciente al sector defensa del estado nacional que, por mandato constitucional, es la única entidad encargada de fabricar y comercializar armas, municiones, explosivos y accesorios de voladuras, responde a las necesidades de sectores como la defensa, seguridad, minería, infraestructura vial y construcción. Tiene una trayectoria de 69 años, y cuenta con una sede de negocios en Bogotá y tres plantas de fabricación; 2 en Cundinamarca y 1 en Boyacá.

Contextualización: A continuación, se presenta la contextualización del sistema productivo.

- Proceso: Gestión de la producción industrial
- Dirección: Dirección de producción FEXAR
- Subproceso: Ensamble de detonadores eléctricos y electrónicos
- Planta: Planta Detonadores (Taller EXEL – Taller EBS)

Capacidad instalada: La capacidad instalada de la Planta de producción de sistemas de iniciación (detonadores) incluye:

- Taller detonadores no eléctricos – (EXEL)
- Taller detonadores electrónicos – (EBS)
- Polvorín 1 (P1)
- Polvorín 2 (P2)
- Polvorín 3 (P3)
- Polvorín 4 (P4)
- Polvorín auxiliar (P. Aux)
- Área contenedores y depósito de materias primas inertes

El portafolio de productos de detonadores no eléctricos en sus diferentes familias puede representar 330 referencias; las cuales se están definidas según el tiempo de retardo y la longitud del tubo de choque del detonador.

- Exel MS
- Exel LP
- Exel Connectadet
- Exel Handidet
- Exel MS Conector
- Exel Enduradet
- Minidet (Subfamilia MS)

Etapas del proceso de ensamble Detonadores No eléctricos – EXEL

- Llegada de materias primas (inertes y materias energéticas)
- Alistamiento de materias primas en zona de alistamiento (híbridos y conectores)
- Ubicación en compartimentos para ensamble
- Corte y formado figura tubo de choque
- Crimpado del detonador
- Ensamble del conector
- Etiquetado y registro de trazabilidad
- Aplicación Silicona
- Inspección de producto terminado
- Empaque y almacenamiento en bodega

- Pruebas de Calidad

Capacidad disponible de producción

- Máquinas: Cinco (5) líneas de ensamble
- Capacidad línea: 1.500 unidades/turno 8 h por línea.
- Capacidad línea mes: 90.000 unidades/24 horas/20 días
- Capacidad mes taller: 450.000 unidades*
- MOD/línea-turno: 3 operarios

El sistema electrónico para voladuras (EBS) está conformado por los detonadores los cuales requieren para su uso de un equipo logger de programación y testeo, y un equipo blaster de disparo. Estos dos equipos tienen diferentes capacidades según las necesidades especificadas en la voladura.

- I-konTM II
- I-konTM Extreme
- UnitronicTM 600
- eDevTM II
- OseisTM

Etapas del proceso de ensamble Detonadores Electrónicos EBS

- Llegada de materias primas (inertes y materias energéticas)
- Alistamiento de materias primas en zona de alistamiento (híbridos y conectores)
- Ubicación en compartimentos para ensamble
- Alistamiento capsulas explosivas
- Transporte capsulas a línea de ensamble
- Crimpado del detonador
- Ensamble del conector
- Conexión a logger (Calidad)
- Prueba de detonadores (culling test)
- Etiquetado y registro de trazabilidad
- Aplicación Silicona
- Inspección de producto terminado
- Empaque y almacenamiento en bodega

Capacidad disponible de producción

- Máquinas: Dos (2) líneas de ensamble
- Capacidad línea: 1.200 unidades/turno 8 h por línea
- Capacidad línea mes: 72.000 unidades /24 horas/20 días
- Capacidad mes taller: 144.000 unidades
- MOD/línea-turno: 3 operarios

Actualmente, la organización ensambla los sistemas de iniciación, bajo un Acuerdo de Colaboración Empresarial entre INDUMIL y una empresa extranjera Australiana. Los tipos de detonadores que están incluidos dentro del alcance del acuerdo de colaboración empresarial son: detonadores no

eléctricos, detonadores electrónicos y detonadores eléctricos sismográficos; no obstante, están definidas unas referencias específicas dentro del alcance del acuerdo. Los detonadores de tipo común No. 8 y eléctricos estándar y permisibles, no hacen parte del acuerdo y por tal motivo, actualmente se importan y comercializan por parte de Indumil. El consumo promedio de cada tipo de sistema de iniciación (detonador), de acuerdo con la información suministrada por la empresa es la presentada a continuación:



Fig. 4. Consumo promedio de detonadores año 2024

La producción de detonadores se planifica cada año según las cantidades definidas en los Planes Operativos de cada vigencia, las cuales se soportan en los respectivos Planes de ventas. A partir de esta planificación se adquieren las materias primas con la empresa aliada mediante el acuerdo de colaboración, lo anterior, mediante órdenes de compra o acuerdos derivados. A continuación, se relaciona e histórico de producción el cual da cumplimiento del Plan operativo de sistemas de iniciación (detonadores) de 2017 a 2023:

TABLA III
HISTÓRICOS DE PRODUCCIÓN 2017 – 2023

Año	Cantidad Plan Operativo (Und)	Producción Detonadores	%Cumplimiento
2017	3.300.000	2.976.462	90%
2018	3.611.950	4.001.584	111%
2019	4.405.500	3.536.405	80%
2020	3.762.490	3.469.286	92%
2021	4.381.414	3.175.801	72%
2022	3.968.607	3.836.471	97%
2023	4.497.686	4.594.517	102%



Fig. 5. Históricos de producción vs Plan Operativo 2017 – 2023

V. CONCLUSIONES

- Para la investigación realizada las fuentes que han presentado un comportamiento anual fluctuante y las principales fuentes han sido el Journal Of Cleaner Production, Computers And Chemical Engineering, Computers And Industrial Engineering, International Journal. Dentro de las áreas de búsqueda de los temas clave de investigación predominan la ingeniería con un 24.5%, seguido de ciencias computacionales con un 20.5%, se encuentran otras áreas significativas como matemáticas, ciencias de decisiones, ingeniería química, energía, entre otras.
- La priorización de temas para la investigación fue primero la Optimización multiobjetivo, seguida de las

- cadenas de suministro, posterior la planificación y la optimización y por último los modelos multiobjetivo y la planificación de la producción.
- De acuerdo con la literatura, la aplicación de modelos multiobjetivos en diferentes sectores de la economía ha marcado la pauta para establecer estrategias de mejora en reducción de costos, maximización de utilidad, solución de problemas de capacidad de producción y almacenamiento y mejora de procesos de producción, sin embargo, en la fabricación de explosivos es mínima la aplicación de métodos de optimización y aplicación de modelos matemáticos que favorezcan los procesos productivos.
 - De acuerdo con la necesidad de la organización del caso de estudio es recomendable formular un modelo matemático multiobjetivo para la optimización y mejora del proceso productivo de detonadores no eléctricos, eléctricos y electrónicos, considerando la planificación de la producción, la mejora del proceso y la minimización de costos productivos y logísticos. Adicionalmente, se buscará fortalecer el proceso productivo de detonadores no eléctricos, eléctricos y electrónicos en Colombia.

REFERENCIAS

- [1] Atlas Powder Company. (1987). Explosives and rock blasting . En *Field Technical Operations* (págs. 79-155). Dallas, Texas: Atlas Powder Company.
- [2] Brandenburg, M., Govindan, K., & Sarkis, J. (2014). Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 299-312.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.032>
- [3] Cancan, Z., Bo, Z., Chao, M., Zhicheng, C., & Lin, S. (2019). Multi-objective optimization considering cost-benefit ratio for the placement of gas detectors in oil refinery installations,. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 62 (0950-4230).
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103956>
- [4] Cavalcante, I., Frazzon, E., Forcellini, F., & Ivanov, D. (2019). A supervised machine learning approach to daa - driven simulation of resilient supplier selection in digital manufacturing. *International Journal of information management*, 86-97.
doi:<http://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.03.004>
- [5] Che, A., Chih-Ying , H., & Wee. , H. (2016). A resilient global supplier selection strategy—a case study of an automotive company . *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1475-1490.
- [6] Cho, S., Kim, M., Lee, J., Han, A., Na, J., & Moon, J. (2023). Multi-objective optimization of explosive waste treatment process considering environment via Bayesian active learning,. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 117.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105463>
- [7] Gao, S., Simchi-Levi, D., Teo, C., & Yan, Z. (2019). Disruption risk mitigation in supply chains: The risk exposure index revisited. *Operations Research*, 831-852.
- [8] Stricker, N., Kuhnle , A., Sturm, R., & Friess, S. (2018). Reinforcement learning for adaptive order dispatching in the semiconductor industry. *CIRP Annals*, 511-514.
- [9] Waschneck , B., Reichstaller , A., Belzner , L., & Alte. (2018). Optimization of global production scheduling with deep reinforcement learning. *Procedia Cirp*, 1264-1269.

Análisis estadístico descriptivo y geoestadístico de las competencias genéricas de las pruebas Saber pro del año 2020 a 2021 en Colombia

Wilson Rodríguez Calderón, *Profesor Titular, Escuela Superior de Administración Pública - ESAP, Orcid:0000-0001-9016-433X* y Myriam Rocío Pallares Muñoz, *Profesor Titular, Universidad Surcolombiana, Orcid: 0000-0003-4526-2357*

Resumen: En este artículo se proporcionan avances sobre los resultados correspondientes al estudio y desarrollo de análisis estadístico descriptivo y geoestadístico de datos anonimizados de las pruebas Saber Pro de los años 2020 a 2021, estos comprenden las competencias genéricas evaluadas en 5 módulos así: razonamiento cuantitativo, comunicación escrita, lectura crítica, inglés y competencias ciudadanas. Para el análisis estadístico descriptivo se emplea el paquete estadístico libre JAMOV, por sus ventajas computacionales y los mapas geoestadísticos que integran la descripción espacial de las competencias genéricas en el territorio colombiano se desarrollan en la herramienta Power Map de Excel en razón a que esta es sencilla y accesible. Para el proyecto se emplea hardware apropiado para el costo computacional en almacenamiento y operaciones, esto es una Workstation DELL con procesador Intel Xeon de 6 núcleos, 32 GB de ram, GPU Nvidia Quadro y Windows 10 Workstation preinstalado.

La metodología empleada puede resumirse en el estudio del estado del conocimiento en técnicas descriptivas para datos numéricos, geoestadística y software libre o comercial aplicable, planteamiento del modelo conceptual en el aspecto de análisis descriptivo de datos del proyecto respecto a los datos particulares de las pruebas saber pro 2020-2021, desarrollo de cálculos y mapas en JAMOV y Power Map de Excel, discusión y conclusiones sobre los resultados parciales obtenidos en el desarrollo del proyecto y producción intelectual para ponencias y publicaciones en revistas.

Las conclusiones muestran importantes hallazgos sobre características estadísticas descriptivas de los datos y análisis sobre la distribución geográfica de las competencias genéricas medidas por las pruebas saber pro en Colombia en los años 2020 y 2021.

Palabras clave: competencias genéricas, saber pro, estadística descriptiva, geoestadística.

I. INTRODUCCIÓN

EL objeto de estudio de la investigación estadística de datos de un proyecto siempre requiere como insumo una base de datos de información primaria o secundaria, en

el caso de este proyecto se trata de información secundaria de carácter abierto y pública, procesada y administrada por la entidad conocida como ICFES [1], estos registros corresponden a los datos anonimizados de las pruebas Saber Pro de los años 2020 a 2021, se analizan principalmente las competencias genéricas evaluadas en 5 módulos. Los datos brutos abarcan los años 2018 a 2021 y tienen un tamaño de matriz de 991577 filas que corresponden a los individuos o unidades experimentales y 57 Columnas, estas incluyen variables de desempeño de los estudiantes en las competencias genéricas y factores cuantitativos y cualitativos observados o evaluados.

Dar de entrada algún tipo de concepto o análisis sobre los datos brutos no es una tarea muy práctica por el tamaño de la población y la cantidad y variedad de factores que participan, por tanto se hace necesario iniciar con un modelo conceptual de los datos y una fase de estadística descriptiva de los datos, los retos técnicos a superar, el modelo computacional y los paquetes o software a emplear, entre otros aspectos a tener en cuenta. Se destaca la posibilidad de avanzar en la descripción geoestadística de la información que muestre la distribución espacial de los datos en Mapas con las diferentes regiones de Colombia.

II. METODOLOGÍA

La metodología se resume en la figura 1 que muestra un diagrama de flujo con los pasos que comprenden este estudio como una fase parcial del proyecto de investigación.

Este trabajo se envió para su revisión el día 27 de Abril de 2024. Este trabajo fue aprobado y apoyado por la convocatoria interna de proyectos de investigación ESAP 2023-2024 bajo el código E5_2023_05, (Autor para correspondencia: Wilson Rodríguez Calderón). Los autores contribuyeron por igual en las diferentes etapas que dieron como resultado esta publicación.

Wilson Rodríguez Calderón trabaja como profesor titular en la Escuela Superior de Administración Pública ESAP, Calle 10 No. 5-92 centro, Neiva, Colombia. (correo electrónico: wilson.rodriguezc@esap.edu.co).

Myriam Rocío Pallares Muñoz trabaja como profesora titular en la Universidad Surcolombiana, Avenida Pastrana Borrero - Carrera 1, Neiva, Colombia, Colombia. (correo electrónico: myriam.pallares@usco.edu.co).

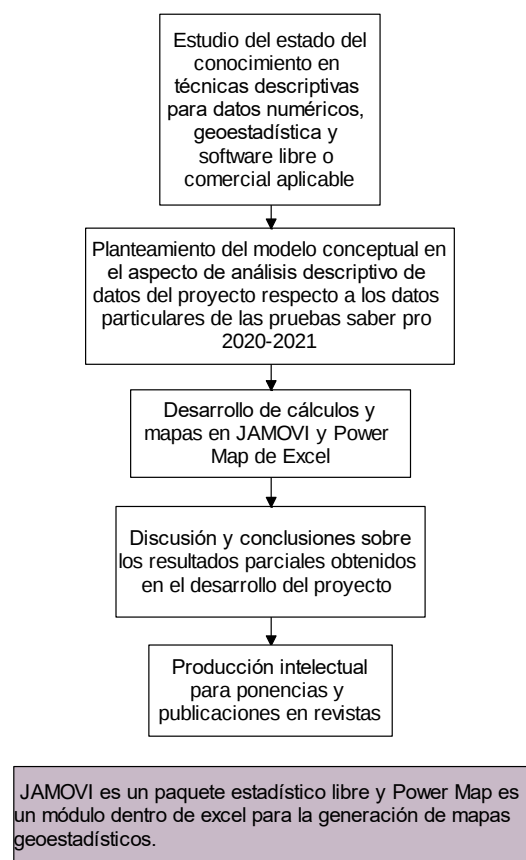


Fig. 1. Flujo de la metodología de la fase parcial adelantada en el proyecto. Fuente: Autores.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de esta fase parcial de la investigación se sintetizan en tablas de estadísticas descriptivas de las 5 competencias genéricas ya mencionadas, se complementa además con histogramas y sus correspondientes curvas de densidad, diagramas de cajas y violines, todos debidamente tratados mediante una tarea de filtrado de variables por columnas y filas que permiten realizar análisis separados para los años 2020 y 2021, para posterior contraste. Los análisis estadísticos descriptivos se realizan mediante el software estadístico libre Jamovi y finalmente se entregan mapas geoestadísticos del comportamiento de las competencias en los diferentes departamentos que componen la geografía colombiana.

Teniendo en cuenta los límites de extensión para esta publicación solo se muestran algunos resultados representativos de la investigación. A continuación se muestran los resultados de los cálculos estadísticos descriptivos de las 5 competencias genéricas estudiadas para los años 2020 y 2021, (Tabla 1 y Tabla 2, respectivamente).

TABLA I
CÁLCULOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE 5
COMPETENCIAS GENÉRICAS SABER PRO DEL AÑO 2020

Raz. Cuantitativo	Comun. Escrita	Lec. Crítica	Inglés	Comp. Ciudadana
----------------------	-------------------	-----------------	--------	--------------------

N	246455	246454	246455	246455	246455
Perdidos	0	1	0	0	0
Media	149	137	152	156	152
Error est. media	0.0649	0.0861	0.0608	0.0688	0.0647
Mediana	148	135	152	154	155
Moda	148	0	158	142	157
Desviación estándar	32.2	42.8	30.2	34.1	32.1
Varianza	1038	1829	911	1166	1030
Mínimo	0	0	0	0	0
Máximo	300	300	300	300	300
Asimetría	0.24	-0.7	-0.0777	0.197	-0.211
Error est. asimetría	0.00493	0.00493	0.00493	0.0049	0.00493
Curtosis	0.322	3.6	0.135	3.01	0.969
Error est. curtosis	0.00987	0.00987	0.00987	0.0099	0.00987

TABLA II
CÁLCULOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE 5
COMPETENCIAS GENÉRICAS SABER PRO DEL AÑO 2021

	Raz. Cuantitativo	Comun. Escrita	Lec. Crítica	Inglés	Comp. Ciudadana
N	248769	248769	248769	248769	248769
Perdidos	0	0	0	0	0
Media	144	137	146	154	143
Error est. media	0.0675	0.0816	0.0631	0.069	0.0705
Mediana	143	137	145	151	145
Moda	141	0	144	129	150
Desviación estándar	33.7	40.7	31.5	34.4	35.2
Varianza	1134	1655	989	1184	1236
Mínimo	0	0	0	0	0
Máximo	300	300	300	300	300
Asimetría	0.234	-0.198	-0.0843	-0.238	-0.268
Error est. asimetría	0.00491	0.00491	0.00491	0.00491	0.00491
Curtosis	0.233	4.53	0.61	4.1	0.784
Error est. curtosis	0.00982	0.00982	0.00982	0.00982	0.00982

Por contraste y análisis entre las Tablas 1 y 2 se puede encontrar que en 2020 el mayor puntaje en promedio estuvo en la competencia en inglés seguido de la lectura crítica y la competencia ciudadana, en 2019 se encuentra un comportamiento similar con el mayor puntaje en promedio en la prueba en inglés seguido de la lectura crítica. La desviación estándar oscila en el intervalo entre 30 y 43 aproximadamente, se destaca la competencia de comunicación escrita como una característica con desviación estándar diferenciada respecto a las demás competencias. En general la competencia de comunicación escrita es la que presenta mayor asimetría y curtosis en 2018 y 2019.

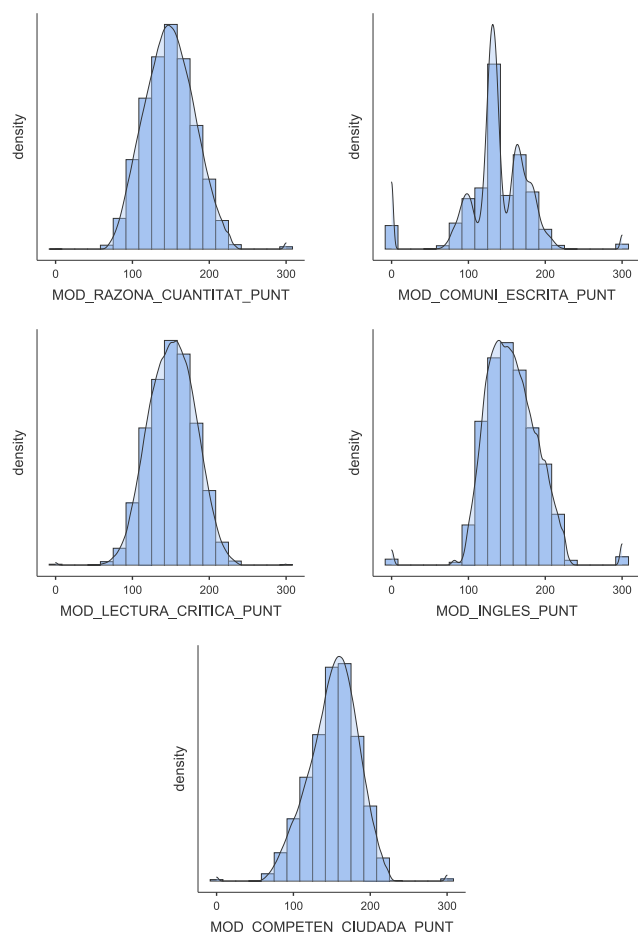


Fig. 2. Histogramas y curvas de densidad para las 5 competencias genéricas Saber Pro del año 2020. Fuente: Autores.

En la Figura 2 se muestran los histogramas de las competencias genéricas para el año 2020 que aproximadamente muestran distribuciones normales, sin embargo, esto debe corroborarse con un test de normalidad.

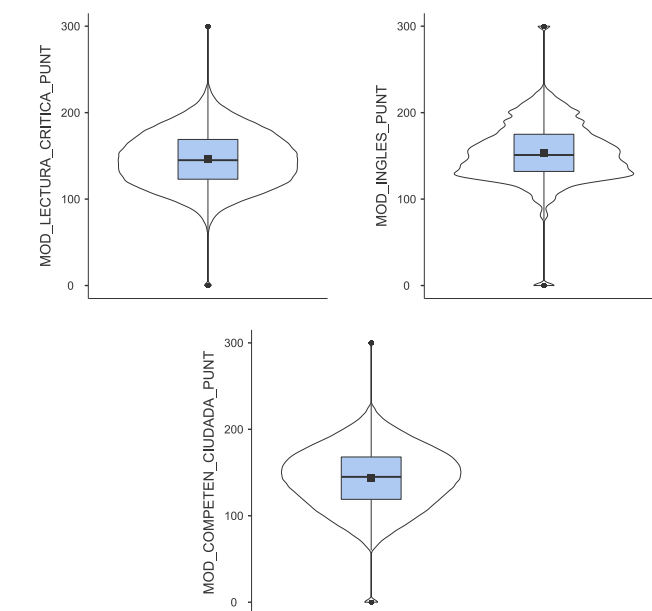
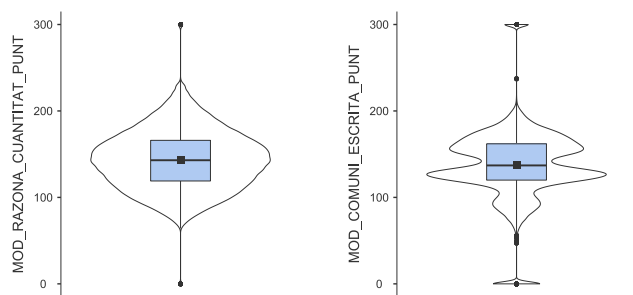


Fig. 3. Diagramas de cajas y violines para las 5 competencias genéricas Saber Pro del año 2021. Fuente: Autores.

La Figura 3 muestra los diagramas de cajas y violines para las competencias genéricas del año 2021 que aproximadamente muestran distribuciones que se acercan al comportamiento típico de la distribución normal, sin embargo, es necesario explorar más adelante la posibilidad de aplicar uno o varias pruebas de normalidad para validar adecuadamente si este es el comportamiento de los datos [2]. La competencia de comunicación escrita muestra multimodalidad en el diagrama de cajas y violines y esto se añade a la alta asimetría y curtosis.

Las Figuras 4 a 8 muestran mapas geoestadísticos de los promedios de las 5 competencias genéricas en el año 2021, con el puntaje jerarquizado por departamentos. En general las figuras muestran tendencia de mayores puntajes en las competencias hacia zonas del interior del país, sin que esto no pueda presentar algunas excepciones. Los diagramas de barras describen detalles de los mejores puntajes en las competencias genéricas por departamentos.

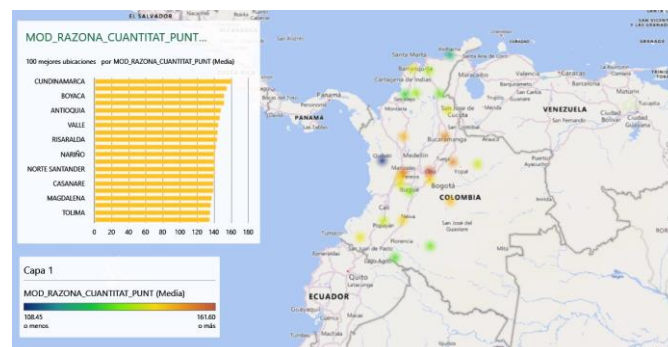


Fig. 4. Caracterización geoestadística de la competencia Razonamiento Cuantitativo Saber Pro 2021. Fuente: Autores.

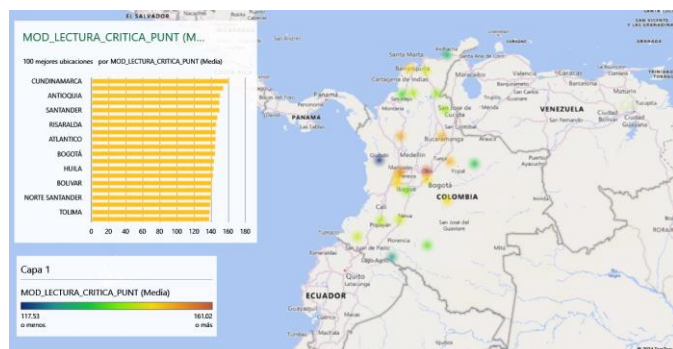


Fig. 5. Caracterización geoestadística de la competencia Lectura crítica Saber Pro 2021. Fuente: Autores.

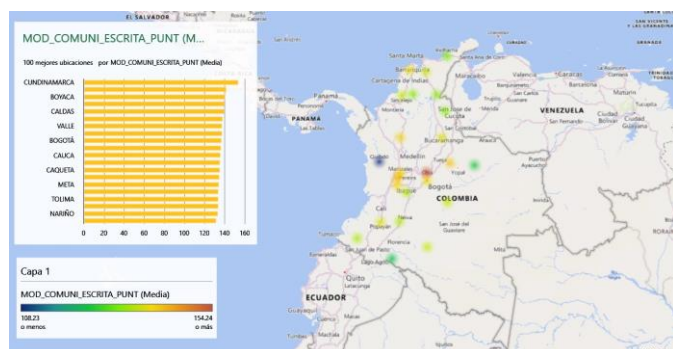


Fig. 6. Caracterización geoestadística de la competencia Comunicación escrita Saber Pro 2021. Fuente: Autores.

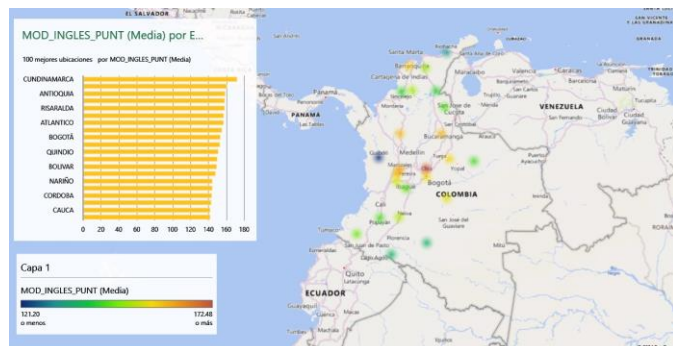


Fig. 7. Caracterización geoestadística de la competencia Inglés Saber Pro 2021. Fuente: Autores.

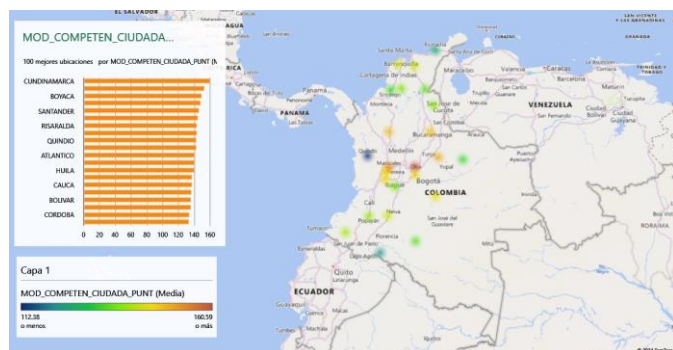


Fig. 8. Caracterización geoestadística de la competencia ciudadana Saber Pro 2021. Fuente: Autores.

IV. CONCLUSIONES

Las conclusiones se resumen en algunos componentes de análisis a destacar como el mayor puntaje alcanzado en promedio en las pruebas genéricas tanto en 2020 como en 2021 en la prueba de inglés. Se registra un comportamiento de los gráficos de histogramas y diagramas de cajas y violines, que se acerca a distribuciones de tipo normal, situación que más adelante puede ser validada por pruebas de normalidad.

La competencia de comunicación escrita presenta valores importantes de asimetría, curtosis y comportamiento multimodal. Se espera en las siguientes etapas del proyecto que sustenta esta publicación reunir más información de los datos, sin embargo, puede destacarse el aporte de la estadística descriptiva y la geoestadística para comprender de manera global el comportamiento de indicadores de las competencias y emplearlos para la formulación de posibles planes de mejora y en la toma de decisiones estratégicas frente al desempeño nacional y regional en las pruebas saber pro.

REFERENCIAS

- [1] Certificados y resultados examen saber pro. [En línea]. Disponible: <https://www2.icfes.gov.co/certificados-y-resultados-examen-saber-pro>.
- [2] Contento M, *Estadística con Aplicaciones en R*. Belmont, UJTD, Colombia, 2020.

Architectural prototype for credit evaluation of Colombian SMEs based on digital banking ecosystems: a proof of concept (PoC)

William S. Rodríguez Rodríguez and Paulo A. Gaona-García

Abstract— Digital banking ecosystems represent the new technological transformation for traditional credit access models of financial products and benefits offered by global financial entities, having real time access to information, declaration and evaluation in acquisition process of any service represents a competitive advantage for entities and possible acquisition for potential clients (Enterprise/Retail). In traditional credit evaluation methods, priority is given to models based on matrix and regression methods based on a large number of public and private variables provided by government sources or private companies. The main focus of this paper is to propose a functional prototype for credit evaluation of SMEs based on a digital banking ecosystem through Business Intelligence strategies and reputation mechanisms. The market analysis will focus on Colombian SMEs, based on the annual reports of government public entities of the EChamber of Commerce and DANE, evaluating the potential for access to financial services, while reputation mechanisms are defined as platforms. of social networks that can share the public opinion of users towards the evaluated entities.

Index Terms— Open Finance, Business intelligence, Financial industry, Open Banking, Digital Transformation, Banking.

I. INTRODUCTION

THE high level competitiveness of the current market and its constant changes require quick, accurate and correct decisions for success within global and regional trade. Added to this, the current global situation caused by the COVID-19 virus pandemic has had an impact on all markets. and financial sectors, for South America, a 5.2% drop in the economy is expected. Some countries in this subregion are greatly affected by the drop-in activity in China, which is an important market for their goods exports (ECLAC, 2020). SMEs are a group of companies within a specific classification. In the Colombian economy, the main characteristic that defines the classification depends on the number of employees that the organization has available; the classification is defined as micro, small and medium-sized companies. These companies represent the fundamental sector of the economy, 99.6% of companies in Colombia are micro, small and medium-sized companies (Fig.1).

William S. Rodríguez Rodríguez is member of Multimedia Interactiva research Group at Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C (wsrodriguezz@udistrital.edu.co).

Paulo Alonso Gaona Garcia is member o GIIRA and Multimedia Interactiva Research Group at Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C (pagaonag@udistrital.edu.co).

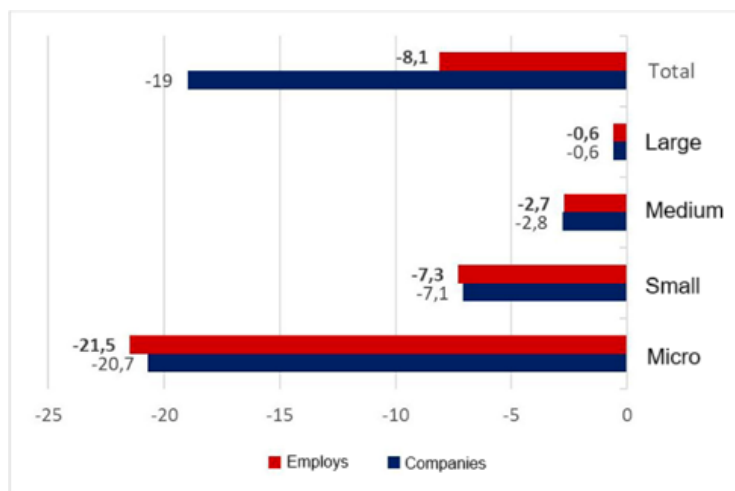


Fig. 1. Latin America and the Caribbean (27 countries): percentage of companies that could close and jobs lost, by company size.

The Colombian government in world governments cooperation, has developed financial programs for the SME sector, supporting decisions in banking financial entities. The fiscal packages announced in the region are the first response to the socioeconomic impact of the pandemic. For their part, the region's central banks have announced “unconventional measures” to expand liquidity, including the purchase of public and private assets. (ECLAC, 2020). Current local conditions present new scenarios where banking organizations will have to adapt and develop new alternatives to handle the increasing number of new customers, supporting this research using a technologic digital ecosystem closing the gap between new data and how implements it.

Based on the previous scenario, an interest is defined in the financial and academic field to propose new methodologies for defining access to credit services. Evaluating traditional risk analysis models, an opportunity is evident to implement a complementary model that allows determining, based on public opinion and rating collected and published on digital platforms, whether an organization has a favorable profile to consider the disbursement of financial aid.

The figure 2 shows the net sales profits classified by each business Macro-sector in Colombia limited only to SMEs, this information has been collected from the Bogotá Chamber of Commerce, the fashion industry is considered a highly dynamic activity, which is why has generated a productive commitment to help the business dream in these sectors through a series of specialized services and various lines of work.

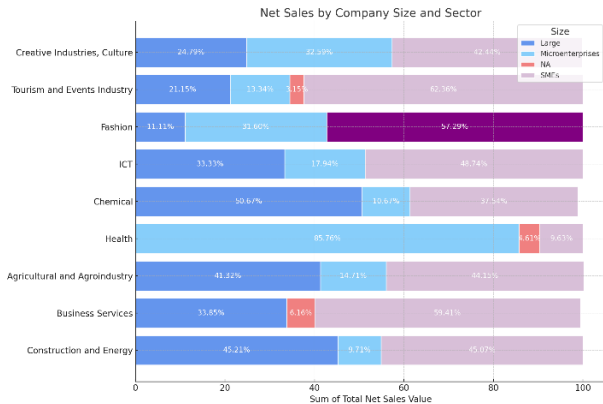


Fig. 2. Proportion of Profits in Macro sectors SMEs

The analysis carried out based on data from the CCB is evident, which results in 57.3% of the net profits in the fashion SME sector, this indicates that it is the second most important sector in terms of annual profits in Colombia.

The Fashion Cluster initiative, created in 2012, aims to improve the business ecosystem of the textile and apparel sector in the Bogotá region. Its main objectives include strengthening business capabilities with a focus on sustainability and global expansion. The government initiative is aimed to consolidate the common relation between the business sector and academia, closing human talent gaps, and promoting dynamic interaction and best practice to productive system. Overall, it seeks to improve the productivity and readability based on recurrent financial reports and create a correct data analysis. (Chamber of Commerce of Bogotá, 2023).

The structure of this document is organized as follows: The first stage comprises the description and definition of the research problem. The second stage focuses on the identification of the research objectives. The third stage compiles the literature framework, which is developed from related research and articles by global authors. The fourth stage defines several functional models for the proposed architecture. Finally, the definition of the research hypothesis is developed and the proposed methodology for the architecture solution model.

II. LITERATURE SURVEY

The landscape presented by 2020 presents humanity in a post pandemic scenario, due to the health crisis generated by the COVID-19 virus. It is a situation that has not only affected individuals or organizations related to the health sector, it has been a situation that has been affecting different entities around the world, both public and private. The Inter-American

Development Bank (IDB) affirms and emphasizes that the effects of the pandemic due to the spread of COVID-19 are shaking the socioeconomic structures worldwide. The impacts are estimated in astronomical figures of loss of lives and jobs (IDB, 2020). These scenarios guide us to structure and analyze how and what levels of the economy will be most affected by the different closures of economic sectors at the national level and which economies could face this current situation. The above, taking into account that those countries that have more mature innovation ecosystems and better developed institutional capacities, will be in better conditions to respond to the crisis more quickly and forcefully (IDB, 2020).

Due to the above, authors such as Zavolokina, Dolata & Schwabe (2016) affirm that governments and banking entities have provided incentives and campaigns over the years aimed at obtaining traditional credit services. Over the past few decades, companies in the financial services sector have become increasingly digital in their processes, products and communication. Due to this development, cooperation increased, because companies and banks in particular must not only rely on their internal competencies, but complement their own competencies with those of other companies in the financial services sector (Zavolokina, Dolata & Schwabe, 2016). This leads companies to carry out a market analysis with respect to identifying the best alternative for decision making. Business ecosystem research is a growing research area driven by the need for a new paradigm to strategize, compete and innovate based on the principle of a network-based economy (Iansiti & Marco, 2004). It is possible to identify the causes of the current situation, defining premises to analyze how the low acquisition of these solutions in banking ecosystems affects the incentives offered by banks, dissatisfaction with obtaining more expensive offers within the market, direct impact on planning within the organizations, less development of the commercial sectors of a country.

Business ecosystems can be defined as a set of factors that contribute to the core purpose of the business ecosystem by generating value for its customers through innovation. Business ecosystems are explained as networks of organizations that are held together through formal contracts and mutual dependence (Teece, 2007). The impact analysis can be carried out taking into account aspects such as application for incentives, market interest rates, growth of SMEs, growth of each sector with respect to SMEs. Taking the above premises, it is evident that, as a result, it is possible to obtain little expansion and growth of the SME sector, which would greatly threaten the economic development of a country.

Colombia currently has a Credit Risk Management System (SARC), regulated by the financial superintendency and its objective when evaluating financial entities is to determine the impact on assets due to non-payment of debtors. The SARC is regulated for all financial entities under the supervision of the Financial Superintendence, so that all institutions have a technological infrastructure and the necessary systems to

guarantee adequate credit administration (Álvarez, Lochmüller & Osorio, 2011).

The SARC must have, at least, the following components (Luís Cerón, Ronald Otero, 2011):

- Credit risk management policies.
- Credit risk management processes.
- Internal or reference models for the estimation or quantification of expected losses.
- Provision system to cover credit risk.
- Internal control processes.

In Colombia there are two main entities that are responsible for receiving, processing, storing and classifying the financial information of a person or company. Datacredito is a large database with positive, negative and historical credit information of millions of people and companies, it is a strategic business unit of Experian Colombia S.A, which has been in the market for 40 years (Datacredito, 2016). SIFIN is a risk center, it was created in 1981 as a business unit of the Association of Banking and Financial Entities of Colombia – Asobancaria to provide Financial Information Central services with the objective of collecting, storing, managing and processing related information. to clients and users of the financial, real, solidarity and insurance sectors (TransUnion, 2020).

Carmin D’Arconte in his work “Business Intelligence applied in Small Size for Profit Companies” (D’Arconte, 2018) developed a BI model applied for small companies, with the aim of increasing profits. In particular, they focused on the Italian SME sector, with a 90% national participation. As a result of this model, they defined a methodology to agilely implement BI into the internal processes of organizations. For his part, the author Parama Fadli Kurnia, in his work “Business Intelligence Model to Analyze Social Media Information” (Kurnia, 2018) identified sources of public opinion such as social networks that represent the fundamental information to determine the reputation that an organization can achieve. . They carried out a study that showed how the BI tool can be fed with digital data in real time so that it can help in decision making within the corresponding organization. As a main aspect, they identified and designed a digital methodology based on 4 stages to obtain classification, analysis and creation of the BI model.

III. METHODOLOGY

The research will be focus on created a PoC to evaluate the feasibility of using Natural Language Processing (NLP) algorithms using public data sources, specifically information from social networks, in the calculation of a credit score based on company’s public image. Initially, social media data was collected using public APIs such as Twitter, leveraging the AWS API Gateway service to manage requests. The data obtained will be stored in Amazon S3 and DynamoDB to ensure efficient and scalable management. Subsequently, NLP

techniques will be used, using AWS Comprehend and libraries such as TextBlob, to analyze sentiment and extract relevant features from the texts. This information was transformed and standardized using AWS Glue and DataBrew, ensuring data quality and consistency. The results of the sentiment analysis were integrated into machine learning models implemented in Amazon SageMaker, which were trained to calculate a credit score based on the behavior and opinions expressed on social networks. Finally, the model results were visualized and evaluated using Amazon QuickSight, allowing for clear interpretation and data-driven decision making. This proof of concept demonstrates how AWS technologies can support an advanced credit scoring application, providing a robust and scalable infrastructure for implementing NLP algorithms on social media data (fig. 3).

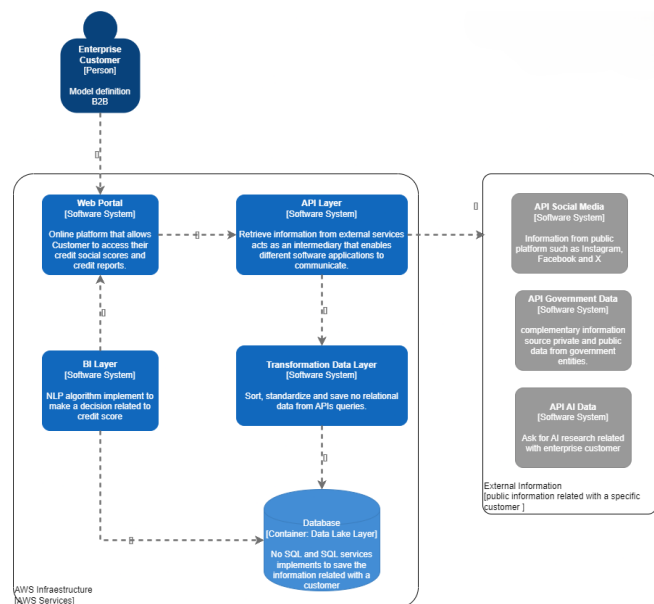


Fig. 3. Context Model proposal

The model defines a context architecture that implements different functional flows with interconnected components intended to provide credit scoring information to enterprise customers. These components include a web portal, an API layer, a BI layer, a transformation data layer, and a database. External information comes from various APIs.

A. Functional Flow

Business Clients are defined as B2B clients who use the platform to access credit score-related information through the Web Portal. An online platform that allows customers to access their credit scores and reports and provides a secure interface for users to view and interact with their credit information. The technical flow implements API Layer as a middleware system to retrieve information from external services, creating a communication layer between the web portal and external data sources, this layer retrieves public information from social platforms such as Instagram, Facebook and X, collects data

from government sources and obtains data for AI research, improving insights related to enterprise customers. ensuring secure and efficient data exchange. The Database proposal is a hybrid data storage solution, data processed using NoSQL and SQL services, supporting scalable data management. The transformation data layer processes the and retrieve information from the API layer to sort, standardize and store data in relational and non-relational repositories for further analysis and queries, the BI layer defines the business intelligence layer using NLP algorithms and analyzes the data. processed to report. decisions related to credit ratings. This PoC provides additional context and data points to enrich the information stored in the system.

B. Data Flow

- Enterprise Customer Interaction: Customers access the system via the Web Portal.
- Data Retrieval: The API Layer fetches relevant data from external sources.
- Data Processing: The Transformation Data Layer processes and standardizes the retrieved data.
- Data Storage: Processed data is stored in the Database.
- Data Analysis: The BI Layer applies NLP algorithms to analyze the data and generate credit scores.
- Information Delivery: The analyzed credit score data is made available to the customer through the Web Portal.
- The entire system is hosted on AWS infrastructure, leveraging its cloud services to ensure scalability, reliability, and security.

This architecture ensures a comprehensive, robust system for managing and analyzing credit score information, providing enterprise customers with accurate and actionable insights. The proposed architecture for the creation of the model based on the previous methodology, includes specific functional stages, where the emphasis is placed on the search and identification of the digital banking ecosystem based on data consultation, the transformation and standardization of public information, and finally, an evaluation scenario is carried out on a specific company. The scoring impact is related to Credit Management and Price Management layer using the business APIs to retrieve information from clients and manage it with a direct, technical APIs are connected to Business APIs and also makes queries to get technical and social media information.

AWS DataBrew interacts with technical APIs to perform data cleansing and preparation operations, AWS Glue acts as a data integration service and transforming data between various services and DynamoDB AWS stores specific information along with Storage S3 AWS to store large volumes of data and is connected to AWS Glue to receive transformed and prepared data by adding information to Amazon QuickSight, which is the data analysis and visualization tool, which takes data from DynamoDB AWS. Long Term Strategy takes data from Amazon QuickSight to create a custom strategy and display it using Price Management (figure 4).

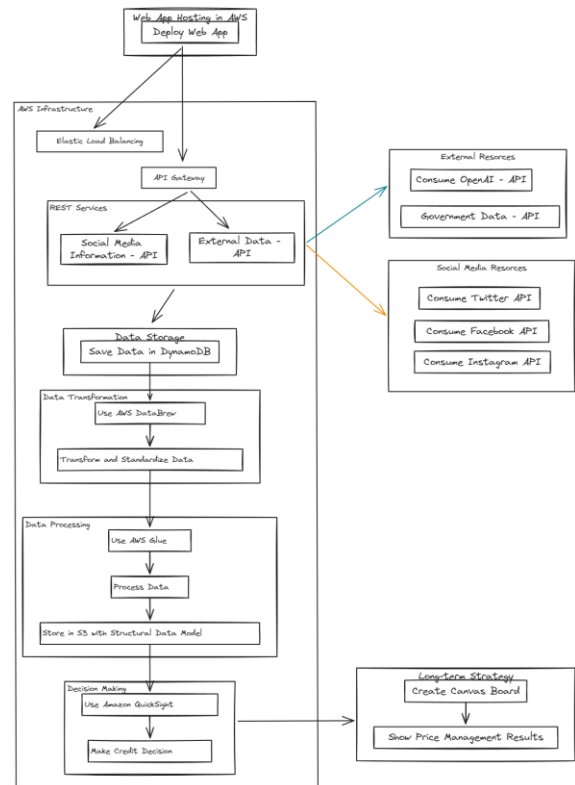


Fig. 4. Functional Solution of Model proposal

The diagram presents step-by-step process using a functional flow that defines a software architecture solution based on deploying web application hosted in AWS, interacting with external APIs, processing data across multiple AWS services using NLP algorithm making a decision scenario using BI.

The web application is deployed on the AWS infrastructure, using Elastic Load Balancing services to ensure correct incoming traffic to the platform, equitably distributing the load between multiple instances to ensure high availability and fault tolerance. API Gateway Acts as an entry point for all API requests and provides secure and scalable routing to the underlying APIs.

- Social Media Information - API: Manage requests related to social media information:
- Consumes OpenAI - API: Gets data from the OpenAI API.
- Government Data - API: Gets data from the Government Information API.

The data obtained from the APIs is stored in an AWS NoSQL DynamoDB database, DataBrew is used to clean, prepare and transform the data for further processing. The processed data is stored in Amazon S3 with a structured data model. Finally, Amazon QuickSight is used for analysis and visualization of credit decision results. A long-term strategy dashboard is created to visualize and manage strategic decisions. This step-by-step process ensures efficient data management from data acquisition to strategic decision making based on detailed analysis and data visualization.

IV. PoC SOLUTION MODEL PROPOSAL

The complete solution will be modeled, but initially the PoC tests will be carried out on the data consumption and the implementation of NLP for sentiment analysis. Firstly, data from social networks will be collected using the public APIs of platforms such as Twitter, creating a Python script making direct consultation with testing companies. The TextBlob library will be used to analyze sentiment and extract relevant features from the texts. These specific tests will allow you to evaluate the effectiveness of the sentiment analysis and adjust the algorithms as necessary before integrating the results into machine learning models developed in Amazon SageMaker. Finally, the results of the sentiment analysis and its impact on credit scoring. This proof of concept validates the effectiveness of integrating AWS technologies and NLP algorithms in creating advanced credit scoring applications (Fig 5).

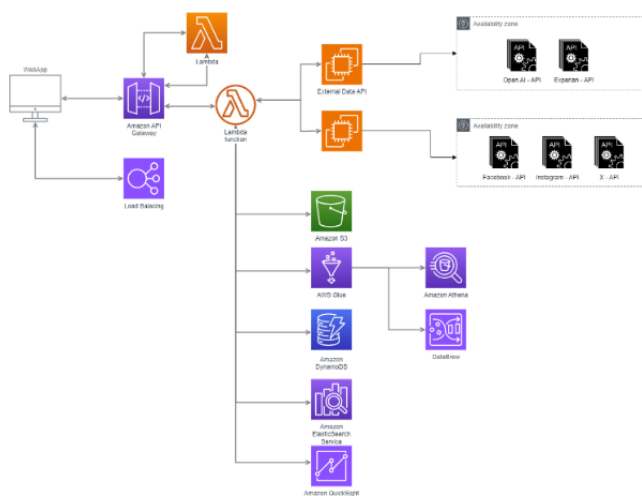


Fig. 5. Solution Model proposal

The diagram above describes a software architecture using multiple AWS services to manage, process, and analyze data.

REFERENCES

- [1]. B. R. Iyer and R. C. Basole, "Visualization to understand ecosystems," *Communications of the ACM*, vol. 59, no. 11, pp. 27–30, 2016.
- [2]. A. Mackenzie, "THE FINTECH REVOLUTION," *London Business School Review*, vol. 26, pp. 50–53, 2015
- [3]. L. Zavolokina, M. Dolata, and G. Schwabe, "FinTech-What's in a Name?" ICIS Completed Research Paper, 2016
- [4]. Sarabia, A. (1995). *La Teoría general de sistemas*. 1st ed. Madrid: Isdefe, p.126.
- [5]. He H., Yang B., Garcia E.A., Li S. Adasyn: adaptive synthetic sampling approach for imbalanced learning *IEEE International Joint Conference on Neural Networks (2008)*, pp. 1322-1328.
- [6]. Abelló, J. Darmont, L. Etcheverry, M. Galfarelli, J. Mazón, F. Naumann, T.B. Pedersen, S. Rizzi, J. Trujillo, P. Vassiliadis, G. Vossen, *Fusion cubes: towards self-service business intelligence*, *IJDWM*, 9 (2) (2013), pp. 66-88.
- [7]. Pablo Angelelli, Michael Hennessey, Pauline Henriquez. *Respuestas al COVID-19 desde la ciencia, la innovación y el desarrollo productivo*. Banco Interamericano de Desarrollo. 1ª Edición. 25 de abril de 2020.
- [8]. M. Iansiti and R. Levien, "The Keystone Advantage: What the New Dynamics of Business Ecosystems Mean for Strategy, Innovation, and Sustainability." Boston: Harvard Business School Press. 2004.

- [9]. D. J. Teece, “Explicating dynamic capabilities: the nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance,” *Strategic Management Journal*, vol. 28, no. 13, pp. 1319–1350, 2007.
- [10]. D’Arconte C. Business Intelligence applied in Small Size for Profit Companies. *Procedia Computer Science*. 2018;131:45-57. doi:10.1016/j.procs.2018.04.184.
- [11]. Parama Fadli Kurnia, Suharjo, *Business Intelligence Model to Analyze Social Media Information*, *Procedia Computer Science*, Volume 135, 2018.
- [12]. Thomas F. Dapp. *Fintech reloaded – Traditional banks as digital ecosystems: With proven walled garden strategies into the future*. Deutsche Bank AG, Deutsche Bank Research, Germany. 2015.
- [13]. Neha Soni, Enakshi Khular Sharma, Narotam Singh, Amita Kapoor, *Artificial Intelligence in Business: From Research and Innovation to Market Deployment*, *Procedia Computer Science*, Volume 167, 2020, Pages 2200-2210.
- [14]. Edward I. Altman, Robert G. Haldeman and P. Narayanan. ZETATM analysis A new model to identify bankruptcy risk of corporations. *Journal of Banking & Finance*, 1977, vol. 1, issue 1, 29-54.
- [15]. Álvarez, S., Lochmüller, C., & Osorio, A. (2011). La medición del riesgo de crédito en Colombia y el acuerdo de Basilea III. *Revista Soluciones de Postgrado EIA*, 7, 49-66.
- [16]. Luis Ángel Meneses Cerón, Ronald Alejandro Macuacé Otero. *Valoración y riesgo crediticio en Colombia*. Finanzas y Política Económica, ISSN: 2248-6046, Vol. 3, No. 2, julio-diciembre, 2011, pp. 65-82.
- [17]. Superintendencia financiera de Colombia. *Diferencias con las centrales de información financiera. Términos de caducidad de la información*. Central de Riesgos de la Superintendencia Bancaria. 2000. *Reforma Financiera*.
- [18]. Alloza, A., Carreras, E., & Carreras, A. (2013). *Reputación corporativa*. Editorial Almuzara.
- [19]. García, J. M. (2005). *Reputación corporativa y creación de valor*. Marco teórico de una relación circular. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa*, 11(2), 81-97.
- [20]. Amezcua, M. P. (2012). *Redes sociales, mecanismos generadores de reputación organizacional para las PyMES*. DOAJ (DOAJ: Directory Of Open Access Journals).
- [21]. Varsha, P. S., Akter, S., Kumar, A., Gochhait, S., & Patagundi, B. (2021). The Impact of Artificial Intelligence on Branding. *Journal Of Global Information Management*, 29(4), 221-246.
- [22]. Taherdoost, H.; Madanchian, M. Artificial Intelligence and Sentiment Analysis: A Review in Competitive Research. *Computers* 2023, 12, 37.
- [23]. Espeleta Bayona, A. P., & Solano Suárez, A. M. (2022). *Evaluación de los desafíos de la implementación del Open Banking en Colombia como política pública*.
- [24]. Kanupriya. (2021). COVID-19 and the Indian Textiles Sector: Issues, Challenges and Prospects. *Vision*, 25(1), 7-11.
- [25]. Zarembo, Adam and Demir, Ender, ChatGPT: Unlocking the Future of NLP in Finance (January 13, 2023). *Modern Finance*, 2023, Vol 1, No. 1, pp. 93-98. <https://doi.org/10.61351/mf.v1i1.43>.
- [26]. Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC), *Economic Survey of Latin America and the Caribbean*, 2020 (LC/PUB.2020/12-P), Santiago, 2020.
- [27]. Inter-American Development Bank (IDB): *Annual Report The Year in Review 2020*. 2021. doi:10.18235/0003118
- [28]. Comercio de Bogotá C. Cámara de Comercio de Bogotá: *Cluster Moda*. <https://www.ccb.org.co/servicios/fortalecemos-tu-sector/moda/cluster-moda>.
- [29]. Colombia TransUnion. *¿Cómo cerro el crédito en 2020?* <https://noticias.transunion.co/como-cerro-el-credito-en-2020/>. Published 24 de febrero de 2021.

Decision making in the agricultural sector for the fruit harvesting process.

María Paula Ruiz Nieto, *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, mp Ruizn@correo.udistrital.edu.co,
Eduyn Ramiro Lopez Santana, *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, erlopezs@udistrital.edu.co

Abstract—This review exposes the different methods used to support decision-making in the agricultural sector during the process of harvesting fruit from crops in which research has been carried out in recent years. Furthermore, in it, the main objectives pursued by these methods used are identified, in order to improve the agricultural collection process and present strategies so that farmers and those involved in the decision making of this process have different tools that can evaluate and apply according to the specific conditions and needs of their crops that allow them to face the different challenges that arise in this sector worldwide, especially in the social, environmental and economic spheres.

Index Terms— Agriculture, Improvement, Process, Collection, Decision making.

[1] I. Introduction

THERE are many challenges that traditional agriculture has been facing in recent years around the world, among which we can mention: population growth, rapid urbanization, resource scarcity, climate change and the increase in the competitiveness of the markets. These challenges pose the need for farmers to know and use different techniques or methods that provide solutions to these problems, so that the decisions they make for their agricultural processes guarantee their permanence in the market and, in turn, contribute to the satisfaction of world demand for food.

[2] II. Generalities of the fruit harvesting process.

The harvesting of the fruit consists of the final phase of the harvesting process, where after cutting, the fruit is grouped in the places arranged for this purpose.

This harvesting process includes the movement of the harvested fruit from each of the crop plants to one or more places designated for its final disposal and can be done manually or with the help of vehicles and livestock.

Harvesting season depend on factors such as the species, its geographical location, and the season of the year.

[3] III. Methodology

The literature review for the preparation of this article was carried out through 4 phases, as shown in Fig.1.

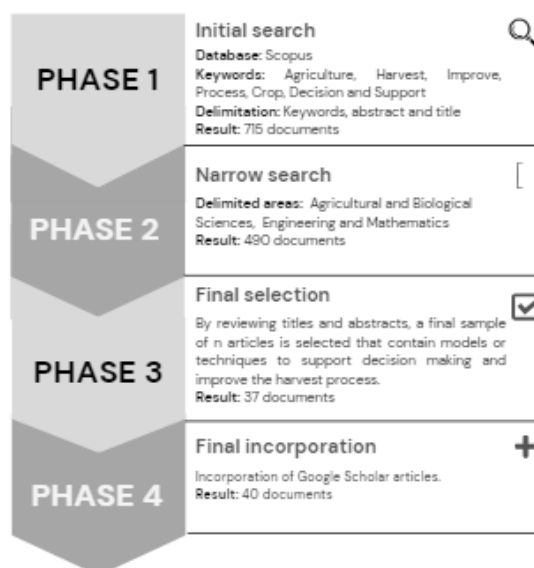


Fig. 1. Bibliographic search methodology.

[4] IV. Scopus review classification.

In the final selection of articles, the highest number of publications are found from 2020, as indicated in Fig.2. China and the United States lead the list of countries with the highest number of publications (14 and 5 respectively), Fig.3.

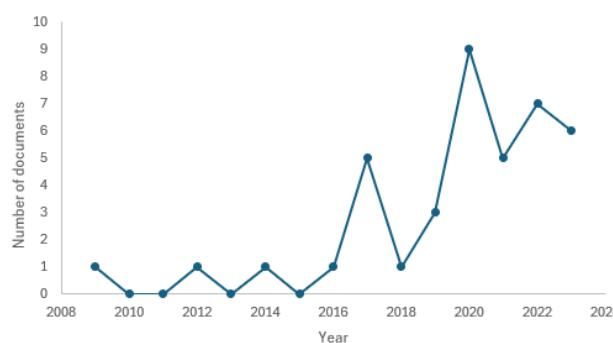


Fig. 2. Publications per year Final Phase.

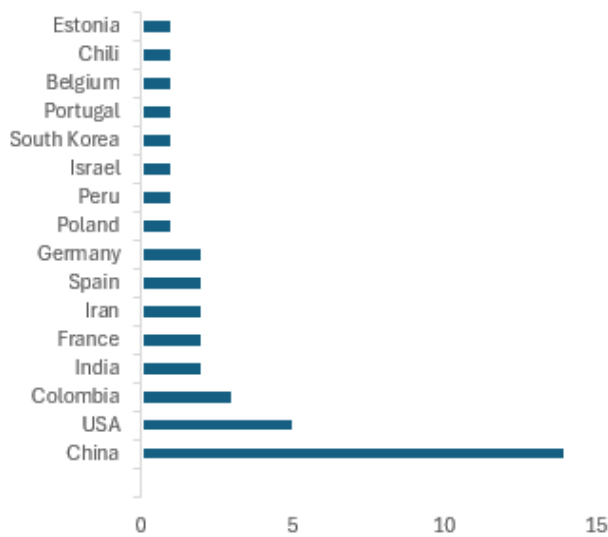


Fig. 3. Publications by country Final Phase.

35 publications correspond to articles, 4 to conference paper and 1 to review.

Regarding the type of crop treated, 25% of the documents do not specify it, with corn, potatoes, beets, wheat, palm and cotton being the crops with the highest number of research works carried out 32.5%, as indicated in Table 1.

TABLE 1.

TYPES OF CROPS AND ITEMS SELECTED IN THE FINAL PHASE

TYPE OF CROP	DOCUMENT TYPE			TOTAL
	THEORETICAL	APPLICATION	REVIEW	
Not precise	7	2	1	10
Corn	2	1		3
Potato		1	1	2
Beet		2		2
Wheat	1	1		2
Palm		2		2
Cotton		1	1	2
Safflower	1			1
Cocoa		1		1
Pea		1		1
Strawberry		1		1
Cane		1		1
Lettuce		1		1
Orange		1		1
Rice		1		1
Olive		1		1
Grape		1		1
Pumpkin	1			1
Apple		1		1
Cabbage		1		1
Melon	1			1
Cereal		1		1
Mint	1			1
Peanut		1		1
TOTAL	14	23	3	40

Of the final articles select, 58% are application articles, 35% theoretical articles and 7% review articles.

[5] V. Support for decision making.

Currently, there are modern decision support systems with multiple applications that are mainly supported in biosystems engineering, engineering sciences and physical sciences [1]. These systems are considered as computer systems that support the decision-making process using data and models for the generation, estimation, evaluation and/or systematic comparison of solution alternatives, helping to gather knowledge, generate alternatives and finally make decisions that are considered the best decisions [2]

Operations research has gained great strength in the natural resources sector: agriculture, fishing, forestry, and mining, studying how to harvest, how to measure environmental impacts and the differences associated with operations optimization methods considering crop cycles and types of resources studied (renewable or not renewable) [3].

[6] VI. Classification of methods to support decision making in the fruit harvesting process.

In the bibliographic review, the methods presented in Fig.4 are identified to support decision making during the fruit harvesting process in the agricultural sector.

A. Mathematical modeling

They are “abstract” algebraic representations that seek to reflect the relationships of the object being modeled. In operations research these relationships are mathematical: equations, inequalities, among others. Mathematical modeling is defined as the cognitive process that must be carried out to construct the mathematical model of a problem or object [4].

B. Simulation

Regarding the simulation of processes, through it is possible to analyze different scenarios of the systems studied for making rational decisions about the precise and efficient use of available resources. Crop simulation models has a fundamental role in monitoring crop growth and development [5]. A very important aspect of simulation is that it offers the possibility of carrying out experimentation on a system without it being operating, evaluating the response of the system to changes that occur in its structure [6].

C. Expert judgment

Technique that consists of an iteration process towards consensus among a group of experts. An example is the Delphi method, which consists of a set of questions asked through a survey by a small team of monitors to a group of experts. The method is mainly used for qualitative forecasts but can also be used to predict the value of a parameter [7].

D. Forecasts

Through predictive models, resource allocation decisions are supported during the harvesting process, knowing in

advance, for example, the quantities of harvest that are expected to be harvested in each upcoming season, using various prediction approaches to support decision making in the reception and storage processes in agricultural cooperatives [8].

E. Lean Manufacturing

Tool that focuses on reducing waste and increasing productivity, with a strong affinity towards value generation and customer satisfaction [9].

Its objective is the elimination of unnecessary waste from the process to reduce costs, improve efficiency, increase flexibility, and maximize the generation of value for customers [10].

In the bibliographic review, there are studies that combine mathematical modeling with Lean manufacturing, represented by phases in which a value flow mapping is carried out to determine times and activities that do not generate value and thus restructure the operations of the process and develop a new design which maximizes production flow [11].

F. Automation

There is a marked trend towards the automation of processes to improve their performance, especially about time and costs.

The increase in the use of machinery during the harvesting process is evident in the literature: use of robots for the harvesting of fruits and vegetables [12], design of mobile platforms for indoor strawberry harvesting [13], autonomous systems for the harvesting of heavy products such as pumpkin [14] and robots with apple detection systems in the orchard [15].

G. Precision agriculture

A new concept that frequently is present in publications and research is precision agriculture, which is defined as the process of adapting agricultural actions to the local and current situation in the field so that the right action is carried out in the right place and at the right time [16], this agricultural management is based on satellite positioning data, information technology, remote sensing technology and robotics [17].

Its main functions are:

- Observation: Acquire data related to the plant through detection technologies that can be integrated into agricultural equipment and guarantee its accuracy.
- Characterization: Interpret the acquired data to provide accurate agronomic information.
- Recommendation: Explicit technical advice with an agronomic approach.
- Application: implement the recommendation in the field.
- Georeferencing: Spatialize acquired data, recommendations, and implementation [18]

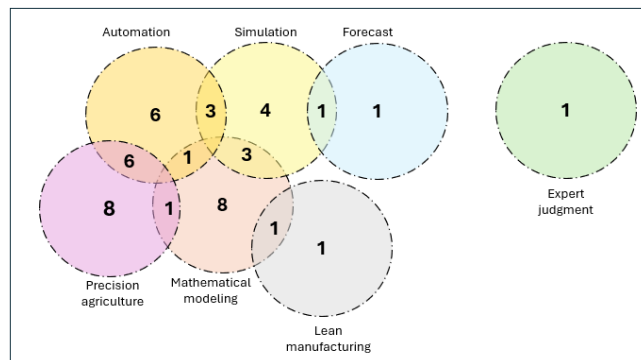


Fig. 4. Support methods for the decision-making process in the fruit harvesting process.

As Fig.4 indicates, automation, precision agriculture, mathematical modeling and simulation are the most used methods to support decision making in fruit harvesting processes. 40% of the reviewed articles use the automation method, 38% precision agriculture, 35% mathematical modeling and 28% simulation. The method with the greatest number of intersections with others is mathematical modeling, relating to Lean manufacturing, automation, simulation, and precision agriculture. The methods with the greatest popularity in recent years are precision agriculture and automation. For its part, expert judgment is the least popular method.

[7] VII. Objectives of the implementation of methods to support the fruit harvesting process.

Fig.5 presents the classification of the objectives pursued with the application of the methods mentioned in the previous section.

The main objective pursued according to the bibliographic review carried out is to maximize the amount of the harvest extracted to improve the expected yield of the crops. For this, tools are used such as forecasts, which allow increasing precision in harvest scheduling [19], mathematical models that allow the management of parameters such as the project budget and the risks generated by the weather[20]. In addition, some studies have developed experimental tests in the field in order to determine parameters related to the harvesting process that allow improving its performance [21].

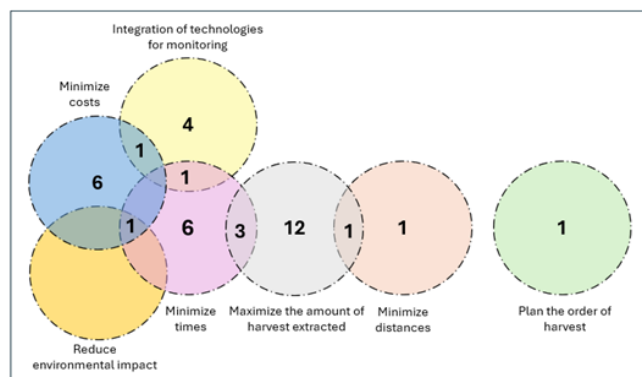


Fig. 5. Main objectives pursued by support methods for the decision-making process in the fruit harvesting process.

With respect to automation, mathematical modeling and precision agriculture, which correspond to the most used methods in supporting decision making in the fruit harvesting process, the main objectives pursued are presented in Fig.6, Fig.7 and Fig.8 respectively.

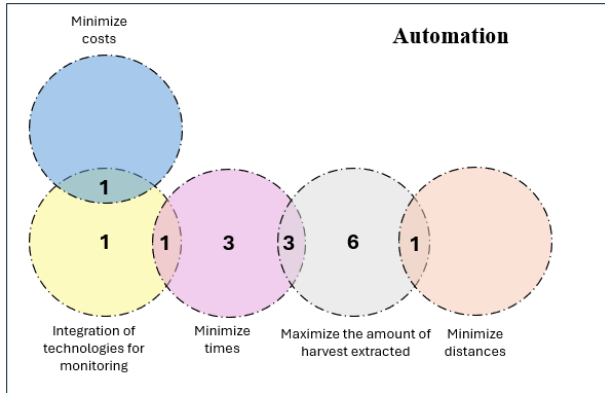


Fig. 6. Main objectives pursued by automation.

In the studies carried out on crops in which the automation method is used, the main objectives pursued are the maximization of the amount of harvest extracted and the minimization of process times.

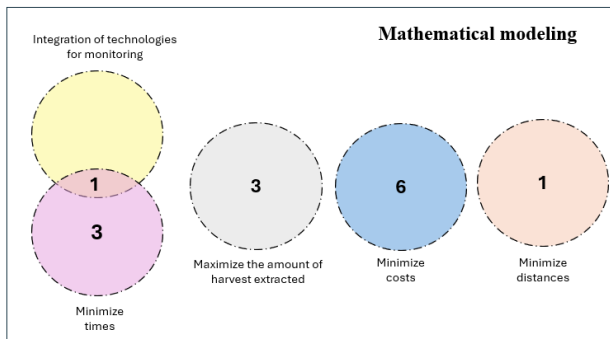


Fig. 7. Main objectives pursued by mathematical modeling.

Regarding mathematical modeling, the main objective pursued is the minimization of costs, followed by the minimization of times and the maximization of the amount of harvest extracted. It is observed that most of these mathematical models focus on a single objective, represented in Fig.7 in the absence of intercessions.

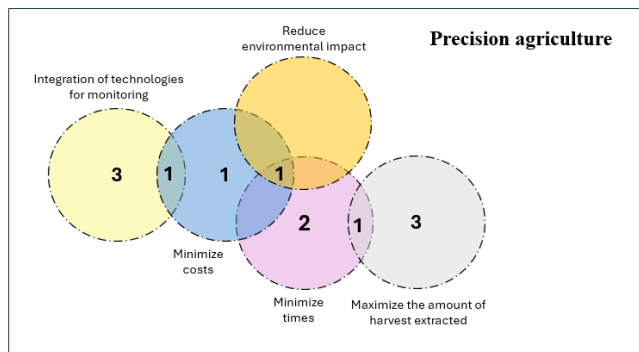


Fig. 8. Main objectives pursued by precision agriculture.

The main objectives pursued by research in which the precision agriculture method is used are the integration of technologies for monitoring and maximizing the quantity of the harvest extracted.

[8] VIII. Results.

During the development of the literature review reported in this article, 7 methods used to support decision-making in the fruit harvesting process of the agricultural sector were identified: Mathematical modeling, Simulation, Automation, Forecasting, Expert judgment, Lean Manufacturing and precision agriculture.

In addition, 7 objectives pursued with the implementation of these methods are identified: Plan the order of the harvest, minimize harvesting times, minimize the distances traveled, minimize the costs of the process, maximize the amount of harvest extracted, integrate monitoring technologies that support precision agriculture and reducing environmental impact.

40% of the documents reviewed implement the automation method, 38% that of mathematical modeling and 35% that of precision agriculture. Automation focuses on the objective of maximizing the amount of harvest extracted, mathematical modeling on cost minimization and precision agriculture both on maximizing the amount of harvest extracted and on the integration of technologies for monitoring the crops that allow to take the right action at the right time and place.

Since 2015, there has been a considerable increase in the number of publications related to the topic, with China and the United States being the pioneer countries.

[9] IX. Conclusions.

The main conclusions of the bibliographic review are the growth in the research and implementation of solutions based on technologies such as telemonitoring, GPS and satellite image taking that serve as support for decision making in the harvesting processes of different types of crops within the context of precision agriculture management.

Mathematical modeling is a widely used tool in the search for improvement of agricultural processes and as support for decision making in the sector. Harvest forecasts complement and support the resource allocation decisions that will be made during the harvesting processes and the simulation allows the behavior of the processes to be predicted through the analysis of different scenarios.

Future studies will focus on the integration of automation and precision agriculture, methods that according to the review carried out are on the rise, with traditional methods such as mathematical modeling.

Regarding the objectives pursued by the methods commonly used during this decision-making, the maximization of the amount of harvest extracted, the minimization of costs and the integration of technologies for monitoring stand out. It is very important to measure the

reduction of environmental impact, there are studies that already mention it, for future research it is important to take this factor into account.

It is expected through this literature review to provide a general vision for those involved in decision-making in the sector so that they can determine and apply the methods that fit their specific needs, as well as establish the objectives they wish to achieve. During its development and in this way as soon as the process is improved by overcoming the existing challenges and problems with the human, technological, environmental and economic resources available, contributing to growth and development with regard to the agricultural sector.

REFERENCES

- [1] A. Knapczyk, S. Francik, M. Wróbel, M. Jewiarz, and K. Mudryk, "Decision support systems for scheduling tasks in Biosystems Engineering", doi: 10.1051/e3sconf/2019.
- [2] C. López de Munáin et al., "Sistemas de apoyo a la toma de decisiones. Una aplicación en el área de Gestión Universitaria."
- [3] T. Bjørndal, I. Herrero, A. Newman, C. Romero, and A. Weintraub, "Operations research in the natural resource industry," *International Transactions in Operational Research*, vol. 19, no. 1–2, pp. 39–62, Jan. 2012, doi: 10.1111/j.1475-3995.2010.00800.x.
- [4] P. C. Gallardo, "La matemáticas en el contexto de las ciencias."
- [5] K. L. Divya, P. H. Mhatre, E. P. Venkatasalam, and R. Sudha, "Crop Simulation Models as Decision-Supporting Tools for Sustainable Potato Production: a Review," *Potato Research*, vol. 64, no. 3. Springer Science and Business Media B.V., pp. 387–419, Sep. 01, 2021. doi: 10.1007/s11540-020-09483-9.
- [6] D. Regalado, "Propuesta para la optimización del proceso de cosecha y recolección de fruto de palma aceitera para la empresa ABC."
- [7] H. J. Pasman and W. J. Rogers, "How to treat expert judgment? With certainty it contains uncertainty!", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 66. Elsevier Ltd, Jul. 01, 2020. doi: 10.1016/j.jlp.2020.104200.
- [8] V. Borodin, J. Bourtembourg, F. Hnaïen, and N. Labadie, "Predictive modelling with panel data and multivariate adaptive regression splines: case of farmers crop delivery for a harvest season ahead," *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 30, no. 1, pp. 309–325, Jan. 2016, doi: 10.1007/s00477-015-1093-6.
- [9] R. Lakshmanan, P. Nyamekye, V. M. Virolainen, and H. Piili, "The convergence of lean management and additive manufacturing: Case of manufacturing industries," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 13. Elsevier Ltd, Apr. 01, 2023. doi: 10.1016/j.clet.2023.100620.
- [10] A. Ghobadian, I. Talavera, A. Bhattacharya, V. Kumar, J. A. Garza-Reyes, and N. O'Regan, "Examining legitimatisation of additive manufacturing in the interplay between innovation, lean manufacturing and sustainability," *Int J Prod Econ*, vol. 219, pp. 457–468, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.jipe.2018.06.001.
- [11] J. R. Polo and A. C. Cansaya, "Productivity improvement in an agribusiness dedicated to the export of snow peas using Lean Manufacturing and Mathematical Optimization tools," in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions*, 2023. doi: 10.18687/laccei2023.1.1.860.
- [12] J. Wu, S. Fan, L. Gong, J. Yuan, Q. Zhou, and C. Liu, "Research status and development direction of design and control technology of fruit and vegetable picking robot system," *Smart Agriculture*, vol. 2, no. 4, pp. 17–40, Dec. 2020, doi: 10.12133/j.smartag.2020.2.4.202011-SA004.
- [13] A. Roshanianfard, N. Noguchi, S. Ardabili, C. Mako, and A. Mosavi, "Autonomous Robotic System for Pumpkin Harvesting," *Agronomy*, vol. 12, no. 7, Jul. 2022, doi: 10.3390/agronomy12071594.
- [14] G. Hu et al., "Fusion of the lightweight network and visual attention mechanism to detect apples in orchard environment," *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol. 38, no. 19, pp. 131–142, Oct. 2022, doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.19.015.
- [15] A. Tayebi, J. Gómez, M. Fernández, F. S. de Adana, and O. Gutiérrez, "Low-cost experimental application of real-time kinematic positioning for increasing the benefits in cereal crops," *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 194–199, 2021, doi: 10.25165/j.ijabe.20211403.5812.
- [16] R. Saddem-yagoubi, O. Naud, K. Godary-dejean, and D. Crestani, "Model-checking precision agriculture logistics: the case of the differential harvest," *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, vol. 30, no. 4, pp. 579–604, Dec. 2020, doi: 10.1007/s10626-020-00313-1.
- [17] R. Põldaru and J. Roots, "Using a nonlinear stochastic model to schedule silage maize harvesting on Estonian farms," *Comput Electron Agric*, vol. 107, pp. 89–96, 2014, doi: 10.1016/j.compag.2014.06.007.
- [18] C. Herrera-Cáceres, F. Pérez-Galarce, E. Álvarez-Miranda, and A. Candia-Véjar, "Optimization of the harvest planning in the olive oil production: A case study in Chile," *Comput Electron Agric*, vol. 141, pp. 147–159, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.compag.2017.07.017.
- [19] L. Shi, B. Wang, Z. Hu, and H. Yang, "Mechanism and Experiment of Full-Feeding Tangential-Flow Picking for Peanut Harvesting," *Agriculture (Switzerland)*, vol. 12, no. 9, Sep. 2022, doi: 10.3390/agriculture12091448.

Analysis and Early Dropout Prediction of students at a Virtual Higher Education Institution: a data analytics approach

C. Estrada, *Docente, IU Digital*, J. Castillo, *Docente, UdeA*, Sara Cañaveral, *Docente IU Digital*; Janeth Isney Martinez Florez *Docente, IUDigital*, Boris Salleg, *Docente IU Digital* J.A. Gutiérrez-Monsalve, *Docente, IU Digital*

Abstract— The Institución Universitaria Digital de Antioquia (IU Digital) offers several virtual academic programs, providing higher education to over nine thousand students from different regions of Colombia. However, the institution faces a challenge as more than 33% of students dropout in the first semesters. To address this issue, a specialized and interdisciplinary group has been established to identify students at risk of dropping out. Based on the information from the Learning Management System (LMS) and the admissions databases, this study aims to identify at-risk students based on sociodemographic, academic, and institutional factors. To achieve this objective, we propose a predictive model for student dropout of 1262 at-risk students from an initial cohort of 2023-1. Next, we followed this cohort for two semesters, providing assistance and support to reduce their dropout risk due to low academic performance. The research found that sociodemographic and institutional factors allow for the prediction of nearly 66% of dropout students.

Furthermore, establishing effective communication with at-risk students via phone or WhatsApp reduced the dropout risk by nearly 21%. The study also identified variables such as chosen career path, platform and connectivity issues, time management strategies, workload, gender, subsidy, economic status, and regional residence as factors associated with dropout rates. This research supports IU Digital's efforts to enhance student retention by providing a model to estimate the dropout risk of each student before they enter the university, streamlining the process of managing student retention and dropout.

Keywords— Analytical model, Career development, Data science, Education, Educational institutions, Machine learning, Universities, Machine learning.

I. INTRODUCTION

STUDENT dropout rates in higher education are a pressing global issue, affecting developing and undeveloped countries like Colombia. Even the United States, a country with significant educational resources, has a dropout rate of 52% [1]. This underscores the urgency and importance of addressing this issue.

At the Colombian level, the data published by the Ministry of National Education - MEN states that "for the year 2018, the annual dropout rate for university programs was 8.79%, for technological programs at 10.75% and for professional technicians at 17.41% in the first semester" [2, p. 1]. Student dropout is presented as a challenge at the national and international level, specifically: "The magnitude of student dropout in Colombia constitutes a challenge for the higher education system in the coming years" [3, p. 9].

At IU Digital, the current process of detecting students at risk of dropout involves various activities by multiple actors,

who have to manipulate and analyze many reports stored in files collected through e-mails every week. This process, while well-intentioned, is time-consuming and may need to be more efficient in identifying students who may leave the university. Therefore, there is a need for a more streamlined and data-driven approach.

Furthermore, the process did not consider additional data useful when detecting whether a person is at risk of dropping out. Currently, the process only considers the statistics of the student's interaction with the Learning Management System (LMS) used in IU Digital (Canvas). One research aims to propose a model that considers socioeconomic and academic data extracted from all educational systems. Likewise, the "Activists for Permanence" program has an innovative tool based on data analytics involving teachers, students, and institutional welfare professionals who work effectively to accompany students at risk of dropping out.

It is essential to note that student dropout is a multifactorial problem; in the Latin American case, it is linked to "structural problems that have not been overcome: growing inequalities in a markedly unequal region, knots of backwardness, low quality of basic education, poor coverage minimal higher education, high dropout levels" [4, p. 8]. Additionally, various models have been created to understand dropout from a psychological, sociological, economic, organizational, and interaction perspective. These models refer to analyzing data such as age, employment status, socioeconomic stratum, internet accessibility, health status, academic integration, social integration, gender, quality of the degree, grade point average, and access to subsidies, among others [5].

Therefore, our approach does not focus solely on technological solutions; it is about incorporating new data associated with socioeconomic and academic information to predict dropout in virtual higher education institutions. This work is innovative because it considers students' interaction with social difficulties, supported by technological tools in a new university in which we can expedite efforts to guarantee student permanence.

II. JUSTIFICATION

According to the dropout rates in higher education on the national and international scene, educational institutions need to strengthen comprehensive support for their students to

guarantee graduation. Specifically at IU Digital, caring for and ensuring the permanence of the student is a fundamental component of their misión: "conceived as a response to the need to expand coverage in quality higher education for the population with access limitations. To university vocational, technical and technological training" [6. p. 1].

Since the beginning of IU Digital, a process has been established to detect students prone to dropouts due to some difficulty in their learning. Aware of the institution's digital nature, the initial procedure was based on reviewing reports of weekly interactions with the learning materials and activities published on the academic platform Canvas.

The detection process was based on the premise that if a student stops viewing the content pages or virtual learning objects available in Canvas, it indicates difficulties in developing their learning process. They will likely need to present evidence of learning on time or present it incompletely.

However, the process ignored other socioeconomic, demographic, and academic variables influencing dropouts, such as Internet access, place of residence, family composition, and grade history. Furthermore, this process was complex because it involved numerous reports and actors: all the institution's teachers, the technical assistants of each faculty member, and the Institutional Welfare professionals.

Consequently, it is necessary to migrate to a more complete and efficient prediction protocol, allowing timely deployment of support mechanisms according to each student detected as prone to dropping out. This protocol aligns with the institution's "100% digital DNA" and contributes to the country's equity by favoring the successful completion of higher education programs initiated by students from different regions.

Being aware of its projection and scope, it is up to IU Digital to promote continuous improvement in its internal operations. Analyzing and detecting at-risk students involves reducing processes, thus optimizing the time and energy of the people responsible for them. Delegating automatable and iterative tasks to a technological tool integrated with the student's information source systems, such as the Canvas academic, Educatic, and reports from SNIES administrative systems, is pertinent.

This project seeks to present a predictable model to support IU Digital students by allowing for the timely prediction of people at risk of dropping out through a model using a data analytics approach. This research's innovative approach involves integrating individual data from students' socioeconomic and academic records. With the integration of this data, we developed a prototype that visualizes the process and ensures greater precision in the predictions.

Additionally, by automating the process, IUDigital Welfare professionals, teachers, and support staff will be able to dedicate more time and energy to supporting students in different ways. This approach explains the decrease in dropout rates from 2021 to 2023.

III. METHOD

To estimate the Model, 1,262 students from the IU Digital of Antioquia were recruited, who began their training process in the 2023-1 semester. For two semesters, their educational careers were monitored through university information systems, such as the admission form, interactions with the educational platform, and teacher grades.

The recruited students came from undergraduate programs such as Business Administration (A.EM.), Tourism and Hotel Business Administration (A.EM.TU.HO.), Administration, Safety and Health at Work (A.SE.SA.TU.), Mechatronic Engineering (ING.MEC.), Advertising and Digital Marketing. (PU.ME.DI.), Technology in Software Development (TE.DE.SOF.) and Cadastral Management and Surveying. The institution's student permanence program monitored them, "Activists for Permanence," generating successive contacts and offering personalized services for particular needs. At the end of the two semesters, the number of students who lost their status as university students due to poor academic performance was computed.

Structured and unstructured data were collected from sociodemographic, institutional, and student well-being factors. From them, contingency tables and machine learning models such as logistic regression, classification and decision tree (CART), and canonical discriminant were used to estimate and validate the models through the correct classification of the students with low RA (sensitivity analysis). The entire statistical component was done in R software.

IV. RESULTS

A. Descriptive statistics: cross-tabular análisis

Of the 1,262 students recruited in the initial cohort, 33% dropped out or were excluded from the program due to low Academic Performance. According to the sociodemographic variables, dropout occurred more frequently in men, students from Stratum 1, coming from the regions of Bajo Cauca, Magdalena Medio, Urabá, and other departments outside of Antioquia (See Table 1 – see categories highlighted in red). Similarly, younger students presented a risk of dropping out due to low academic performance (low AP), according to what was observed in Figure I.

TABLE I
CONTINGENCE TABLES OF SOCIOECONOMICAL VARIABLES
AFFECTING DROPOUT BY LOW AP.

Subsidy	Drop.Low.AP.		Total	Chi2	
	0	1		P-Value	
NO	153 (76%)	49 (24%)	202		
YES	687 (65%)	373 (35%)	1060	0.003	
Total	840 (67%)	422 (33%)	1262		

Gender	Drop.Low.AP.		Total	Chi2	
	0	1		P-Value	

Female	586 (69%)	266 (31%)	852	0.048
Male	252 (62%)	154 (38%)	406	
Other	2 (50%)	2 (50%)	4	
Total	840 (67%)	422 (33%)	1262	

Economic.Stat us	Drop.Low.AP.		Total	Chi2 P-Value
	0	1		
1	422(62%)	254(38%)	676	0.006
2	288 (73%)	109 (27%)	397	
3	113 (72%)	44 (28%)	157	
4	10 (67%)	5 (33%)	15	
5	1 (33%)	2 (67%)	3	
6	2 (100%)	0 (0%)	2	
Total	836 (67%)	414 (33%)	1250	

Residence.Reg ion	Drop.Low.AP.		Total	Chi2 P-Value
	0	1		
BAJO CAUCA	71 (60%)	48 (40%)	119	p<0.001
MAGDALENA MEDIO	12 (57%)	9 (43%)	21	
NORDESTE	29 (78%)	8 (22%)	37	
NORTE	41 (73%)	15 (27%)	56	
OCCIDENTE	31 (70%)	13 (30%)	44	
ORIENTE	70 (81%)	16 (19%)	86	
OTHER.DEPARTM.	212 (61%)	138 (39%)	350	
SUROESTE	58 (71%)	24 (29%)	82	
URABA	96 (60%)	63 (40%)	159	
VALLE DE ABURRÁ	220 (71%)	88 (29%)	308	
Total	840 (67%)	422(33%)	1262	

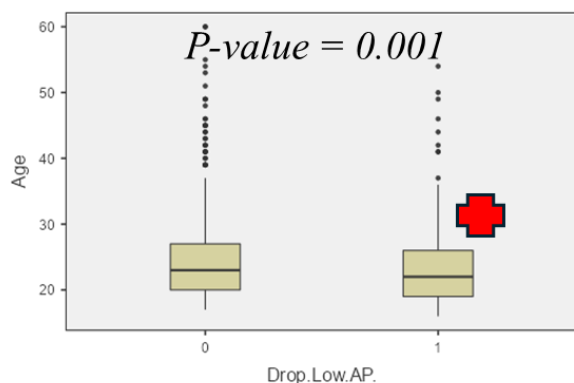


FIGURE I: DROPOUT OF STUDENTS ACCORDING TO AGE. ASTERICK IN RED INDICATES LOW AP.

According to the variables related to the monitoring carried out by IU Digital, the students of the Hotel and Tourism

Business Administration (A.EM.TU.HO), Occupational Health and Safety Administration (A.SE. SA.TU.), and Mechatronic Engineering (Ing.Mec), they presented a risk of dropping out due to low AP. Likewise, difficulties with internet connection, difficulties with the management of the CANVAS platform (virtual learning environment), problems with time management and work activities concomitant with the study were the variables that predispose the students of the cohort of the IUDigital to defect due to low AP (See Table 2).

TABLE 2
CONTINGENCY TABLES OF INSTITUTIONAL VARIABLES
AFFECTING DROPOUT BY LOW AP.

Career	Drop.Low.AP.		Total	Chi2 P-Value
	No	Yes		
A.EM.	310 (72%)	121 (28%)	431	0.022
A.EM.TU.HO.	65 (60%)	44 (40%)	109	
A.SE.SA.TU.	263 (62%)	162 (38%)	425	
ING.MEC.	22 (61%)	14 (39%)	36	
PU.ME.DI.	108 (66%)	55 (34%)	163	
TE.DE.SOF.	65 (74%)	23 (26%)	88	
TEC.GE.CA.AGRI.	7 (70%)	3 (30%)	10	
Total	840	422	1262	

Contact.Stablsh	Drop.Low.AP.		Total	Chi2 P-Value
	0	1		
NO	417 (64%)	233 (36%)	650	0.052
YES	423 (69%)	189 (31%)	612	
Total	840 (67%)	422 (33%)	1262	

Wellness.Help	Drop.Low.AP.		Total	Chi2 P-Value
	0	1		
Career.Election	1 (100%)	0 (0%)	1	p<0.001
Connec.Diff.	18 (51%)	17 (49%)	35	
Death.Familiar	0 (0%)	1 (100%)	1	
Desmotivation	2 (33%)	4 (67%)	6	
Economics	10 (100%)	0 (0%)	10	
Familiar.Diffic.	0 (0%)	3 (100%)	3	
Health	0 (0%)	4 (100%)	4	
Platform.Diffic.	11 (58%)	8 (42%)	19	
Study.Techniques	2 (67%)	1 (33%)	3	
Time.Management	7 (39%)	11 (61%)	18	
Workload	1 (11%)	8 (89%)	9	
Total	52 (48%)	57 (52%)	109	

Semester.Level	0	1	Total	P-Value
1	724 (64%)	408 (36%)	1132	
2	92 (88%)	12 (12%)	104	
3	21 (91%)	2 (9%)	23	p<0.001
4	3 (100%)	0 (0%)	3	
Total	840 (67%)	422 (33%)	1262	

A. Proposed models for the early prediction of dropout due to low AP in the IUDigital of Antioquia

A logistic regression is first proposed to predict dropout due to low AP. Considering the variables that best explain the dropout phenomenon and present the best fit, the professional career of choice, the region of origin, whether the student had a scholarship or subsidy, whether direct contact could be established with the student, and the socioeconomic stratum were included. This Model allowed us to establish that coming from the Eastern Antioquia region reduced the risk of dropout by 53%, in the same way being a woman was associated with a reduction in the risk of dropout of 32%, being in semesters greater than 2, reduces the risk of Dropout due to low of 89%. For their part, the programs of A.EM., A.EM.TU.HO, A.SE.SA.TU, and PU.ME.DI. had students with a better risk of dropping out in their classrooms.

In order to illustrate the behavior of the Model, the classification and regression tree that represents logistic regression is presented in Figure II. In this Model, 0 indicates no dropout risk, and 1 indicates a dropout risk. The most representative nodes are the semester, the degree, and the administrative aid given to students during the contact process. In this case, for the students who presented levels more significant than two (right side), 11% of them presented a risk of dropping out due to low AP, while 89% did not present such risk.

In the same way, passing through the correct node, there are students with a level lower than two if the student is from outside the A.EM, A.EM.TU.HO, A.SE.SA.TU, and PU programs will likely drop out due to a low AP of 78%, corresponding to 3% of the students admitted to the cohort (Figure II). This Model managed to predict 66% of the students with low RA and obtained an AUC in the ROC curve of 0.7, so the entry of new variables is required to achieve a better prediction.

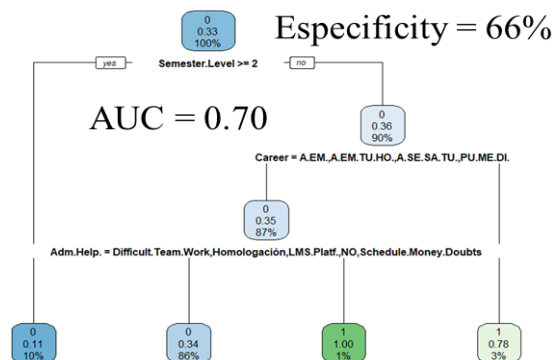


FIGURE II: CLASSIFICATION AND REGRESSION TREE (CART) OF A LOGISTIC REGRESSION WHICH PREDICT DROPOUT BY LOW AP.

Finally, a Canonical Discriminant model is presented in Figure IV to establish variables that classify students at risk of dropping out due to low AP. In this Model, what was found in the logistic regression and the classification and regression analysis is confirmed. In the right panel (Canonical Scores), the students who presented a risk of dropping out due to low AP (1) are discriminated from those who did not (0). The vectors with the variables explaining the students' differences are presented in the right panel. In this case, a significant increase in age, being a woman, a high socioeconomic status, attending an advanced level of university education, the enrolled program, and residing in Eastern Antioquia turn out to be protective factors against dropping out due to low AP in students of the IUDigital of Antioquia. The Model predicted that 58.64% of students are at risk of dropping out due to low AP (Figure III).

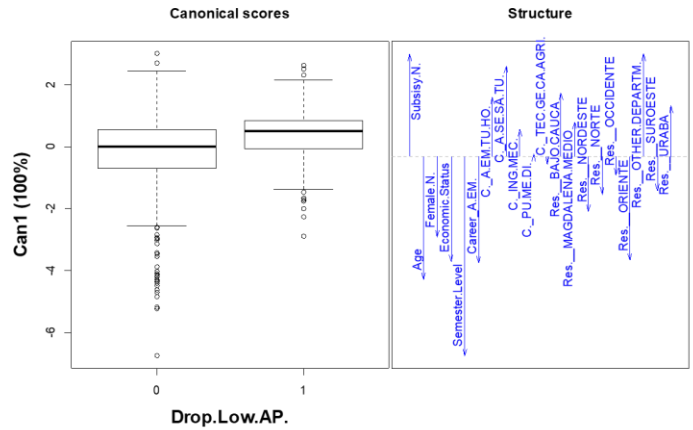


FIGURE III: CANONICAL DISCRIMINANT WHICH EXPLAIN THE CLASSIFICATION OF STUDENTS WITH RISK OF LOW DROPOUT BY LOW AP.

V. CONCLUSIONS

Dropout due to low Academic Performance in a Virtual University is a phenomenon that can only be understood from multiple dimensions. Considering institutional and sociodemographic variables, the dropout predictive models proposed in this research fail to generate adequate validity indicators, so including other variables that allow for more information about the students is required. In this sense, including variables of a more personal nature and cognitive and non-cognitive dimensions of the students is recommended.

Many works like this have been done in face-to-face universities around the world. However, this study is innovative because it is carried out in a newly created virtual university and will allow relevant information on student assertive support strategies

VI. REFERENCES

- [1] Agencia de educación superior de Medellín, SAPIENCIA. (2017, julio). *Deserción en la Educación superior*. [En línea]. Disponible en: https://sapiencia.gov.co/wp-content/uploads/2017/07/BOLETIN_ODES_DESERCION_EN_LA_EDUCACION_SUPERIOR.pdf
- [2] Sistema para la prevención de la deserción de la educación superior, SPADIES. (2021, julio). *Estadísticas de Deserción*. [En línea]. Disponible en: https://www.mineduacion.gov.co/sistemasdeinformacion/1735/w3-article-357549.html?_noredirect=1
- [3] C. Guzmán, D. Durán, J. Franco, E. Castaño, S. Gallón, K. Gómez y J. Vásquez, *Deserción estudiantil en la educación superior colombiana*, 1ª ed. Bogota, Colombia: MEN, 2009, Consultado en: Julio 14, 2023, [En línea]. Disponible en: https://www.mineduacion.gov.co/sistemasdeinformacion/1735/articulos-254702_libro_desercion.pdf
- [4] Unión de universidades de América Latina y el Caribe, UDUAL, "Reformular los ideales y prácticas de la Educación Superior para asegurar el desarrollo sostenible del planeta y de la humanidad," en *Proc. WHEC2022*, Barcelona, España, 2022, pp. 8–10.
- [5] C. Peralta, "Modelo conceptual para la deserción estudiantil universitaria chilena," *Estudios Pedagógicos*, vol. 34, no. 2, pp. 65–86, 2008. doi: 10.4067/S0718-07052008000200004.
- [6] Institución Universitaria Digital de Antioquia, IU Digital. (2023, julio). "Presentación. Nuestra Institución," [En línea]. Disponible en: <https://www.iudigital.edu.co/NuestraInstitucion/Paginas/Presentacion.aspx>

Metodologías del Planeamiento Energético Enfocadas a la Expansión del Sector de Generación de Energía Eléctrica - Caso Colombiano

Francisco D. Moya Ch.

Resumen—Este trabajo ilustra algunos de los mecanismos que para realizar un planeamiento energético de corto, mediano y largo plazo en el sector eléctrico encaminado a expandir el sector de generación. El caso de estudio se enfoca en Colombia. Se ilustra inicialmente una descripción general sobre metodologías de Planeamiento Energético en el sector eléctrico. A seguir, se describe un panorama general del Planeamiento Energético en Colombia. Seguidamente, se ilustra el mecanismo de Planeamiento energético en el corto plazo. A seguir, se describe el mecanismo de Planeamiento Energético en el mediano plazo. En seguida, se ilustra los mecanismos de Planeamiento Energético en el largo plazo, para finalmente describir los puntos positivos y negativos que han resultado de dichas metodologías.

Palabras Claves— Planeamiento Energético, Expansión del Sistema Eléctrico en Generación. Planeamiento Energético en el Corto Mediano y Largo Plazo.

I. INTRODUCCIÓN

Cada día cobra más importancia el Planeamiento Energético que la humanidad debe realizar para alcanzar las diferentes metas y estrategias que tienen un interés común internacionalmente relacionadas en especial con el cambio climático, sostenibilidad energética, etc. Se resaltan aquellas metas establecidas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Se hace imperativo establecer metodologías asertivas de Planeamiento Energético que puedan ilustrar los caminos correctos para attingir las metas en la reducción de emisiones de efecto invernadero, la disminución de la dependencia del petróleo, entre otras.

Cada región y cada país presenta una característica particular en la forma en que se realiza el planeamiento energético, dependiendo de diferentes factores como lo son: consumo energético, disponibilidad de recursos energéticos, nivel de desarrollo, intensidad energética, política energética, etc, como es ilustrado en [1]. La estrategia correcta en el planeamiento energético, permite que una región y/o país, enfrente o no situaciones de crisis energéticas, en donde se pueden presentar diferentes escenarios como lo son: altos precios de los energéticos, carencia de energéticos, restricción en el uso de energéticos, enfrentamientos políticos por el uso de energéticos,

entre otros.

La continuidad en el suministro de energía eléctrica, es de vital importancia, dado el intensivo uso de la electricidad en cada una de las actividades del diario vivir; por lo anterior, el Planeamiento Energético en el sector eléctrico, se debe realizar cada día con metodologías más acertadas. Este trabajo, ilustra diferentes metodologías de Planeamiento Energético, enfocado en el caso de estudio de un país en desarrollo como lo es Colombia. En la siguiente sección se ilustra una metodología de Planeamiento Energético en el corto plazo. A seguir, se describe la metodología en el mediano plazo. Finalmente, se ilustra la metodología en el largo plazo, describiendo los puntos positivos y negativos en cada una de las metodologías.

II. EL PLANEAMIENTO ENERGÉTICO EN EL SECTOR ELÉCTRICO.

Dado la gran dependencia que se tiene en el suministro de electricidad en todas las actividades humanas, es de vital importancia realizar un planeamiento de los sistemas eléctricos en el corto, mediano y largo plazo, con el fin de garantizar las exigencias de la demanda.

En los inicios de la década de los años 90, varios países cambiaron la forma en que operaban los sistemas eléctricos, siguiendo el modelo propuesto por Smith, con la implementación del neoliberalismo, copiando los modelos de regulación desarrollados por el Reino Unido, Estados Unidos y Chile, en la región de Latinoamérica se cambió de un modelo vertical en donde el estado tenía el control absoluto de la cadena de producción y suministro del servicio de electricidad, a un modelo horizontal, en donde se estableció un sistema de mercado, permitiendo la participación del sector privado en cada uno de los sectores de generación, transporte y distribución de la electricidad, creando sectores nuevos como el de comercialización. Las reformas realizadas en diferentes países, permitieron asegurar el suministro eléctrico al capitalizar el sector eléctrico con recursos privados, apalancando la precaria situación económica del sector eléctrica, disminuyendo significativamente las pérdidas técnicas y no técnicas, financiando la construcción de nuevos proyectos de generación, transporte, distribución, entre otros

Francisco D. Moya Ch. es Ingeniero Electricista, docente investigador en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. (email: fdmoyac@udistrital.edu.co), integrante en los grupos de investigación GESETIC y GCEM.

beneficios, tal como se describe en el texto en [2].

En el caso colombiano, las Leyes 142 y 143 establecidas en la constitución escrita a partir del año 1991, ratificaron los servicios públicos domiciliarios como un derecho básico, siendo obligatorio para todos los actores de la cadena del sector eléctrico, brindar a todos los usuarios un servicio confiable y con precios justos. El nuevo modelo de operación y administración del sector eléctrico en Colombia estableció la participación del estado como ente regulador y de vigilancia, pretendiendo dejar al sector privado principalmente la función de realizar las inversiones necesarias para mantener y expandir cada uno de los sectores como lo son: generación, transporte, distribución y comercialización. Entidades como la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), tienen en sus manos la responsabilidad de mantener un sistema eléctrico confiable, con tarifas justas, y con la certeza de un suministro seguro en el corto, mediano y largo plazo, enfrentando situaciones climáticas extremas como los fenómenos del Niño y el fenómeno de La Niña. Para lograr dichas metas, en Colombia se ha establecido un mercado energético tal como se describe en la Resolución en [3], con diferentes formas de operación como se ilustra en la Figura 1, cada uno buscando un fin específico, complementándose entre sí, los cuales hoy en día, buscan metas inclusive más ambiciosas a las básicas, como lo es, la reducción del impacto ambiental, promoviendo por ejemplo el uso de fuentes de energía limpias, así como la sostenibilidad energética.

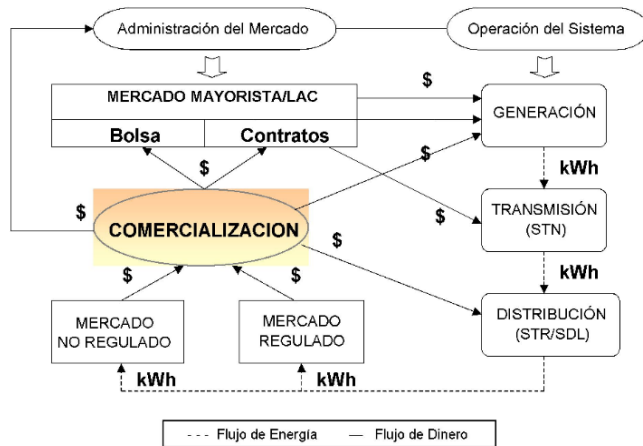


Fig. 1. Mercados Eléctricos en Colombia según [3].

El modelo energético implementado en Colombia desde el inicio de la década de los años noventa, ha permitido mantener el suministro a la gran mayoría de la población, según lo informado en reportes como en [4], enfrentando situaciones críticas como los eventos del fenómeno del Niño en el año 2015 y más recientemente en el 2024. Actualmente en el sector eléctrico, se tiene una matriz energética de plantas de generación instaladas que alcanzan los 18851,84 MW, en donde el 66% pertenece a sistemas hídricos, especialmente con grandes embalses artificiales de agua; el 32% pertenece a termoelectrica que utilizan principalmente el gas natural, así

como Diesel y carbón; y finalmente un 3% con energía solar y un valor mínimo con una planta eólica, tal como se ilustra en la Figura 2, según el reporte publicado en [5]. Dicha matriz, presenta como una gran ventaja la producción de electricidad con un alto grado de limpieza, dado que en la mayoría del año se utiliza la fuerza del agua para su producción, siendo una fuente natural limpia y renovable, suministrando electricidad inclusive a otros países como Ecuador, el cual ha enfrentado en el año 2023 y primer semestre del año 2024 largos periodos de cortes de energía. La gran desventaja, consiste en que la alta dependencia de los grandes embalses de agua, enfrenta al sector eléctrico a posibles situaciones de crisis en épocas de larga sequía, como ya ha sucedido especialmente en los primeros meses del año 2024, cuando los niveles del agua en los embalses bajaron a valores históricamente nunca antes registrados, estando muy cerca del racionamiento eléctrico, tal como sucedió en los años 1992 y 1993, cuando por varios meses se experimentaron cortes de energía que duraron hasta 12 horas en el día.

Así pues, las estrategias del Planeamiento Energético en el sector eléctrico, debe no solo preocuparse por la seguridad en el suministro energético, y la reducción del impacto ambiental, sino adicionalmente, enfrentar los fuertes cambios climáticos que actualmente se presentan.

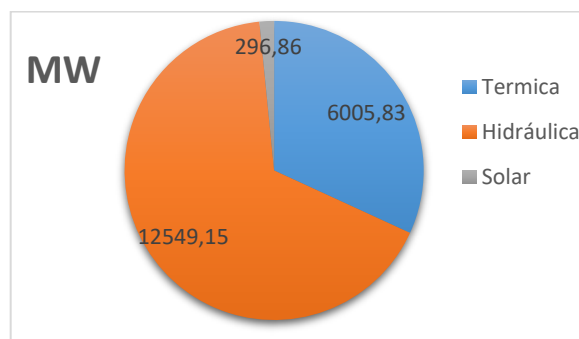


Fig. 2. Matriz energética sector eléctrico según datos en [5].

III. PLANEAMIENTO EN EL CORTO PLAZO

El sistema eléctrico en Colombia funciona a través de la implementación de diferentes sistemas de Mercado Eléctrico, siendo el de mayor tamaño el que se presenta entre vendedores y compradores directamente usando Contratos Bilaterales, seguido por el Mercado de Bolsa de Energía diario, así como el conocido como Cargo por Confiabilidad descrito en la Resolución en [6], tal como se ilustra en la Figura 3, según lo reportado en el Informe en [7].

El Mercado Energético establecido en la Bolsa de Energía diario, es un mercado de corto plazo, en el que participan los actores que venden y compran electricidad ofertando y/o comprando energía eléctrica programada para el día siguiente. Dicho mercado actúa como mecanismo complementario al mercado de mediano plazo, para cubrir las brechas entre los contratos ya establecidos con anterioridad, y la demanda que se presentará al día siguiente, es decir, actual como un mercado entre lo programado y lo demandado en el corto plazo. La Bolsa

de Energía, ha venido operando desde el año 1995, teniendo como objetivo principal cubrir en totalidad la demanda del sector eléctrico, buscando los menores costos para los consumidores, siendo esta última su mayor ventaja, siendo obligatorio la publicación del comportamiento de los mercados energéticos según la Resolución en [8]. Desde su implementación, Colombia ha presentado costos de electricidad bastante bajos, con valores como por ejemplo \$0,019 por kWh en el área de generación, en diferentes periodos, debido principalmente a dos factores: a) utilización del agua de grandes embalses artificiales para producción de electricidad a gran escala, y b) la preferencia que se realiza en la Bolsa para asignar los generadores que presentan menores precios.

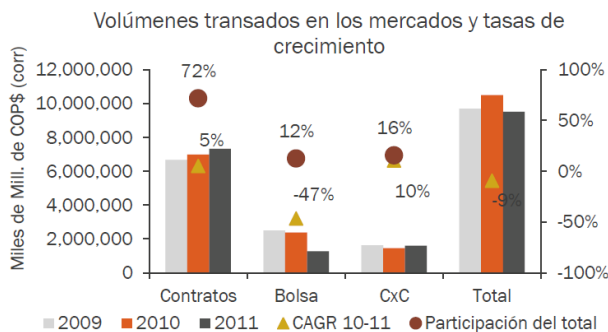


Fig. 3. Volúmenes transados en los mercados según [5].

La desventaja de una Bolsa de Energía, es la volatilidad que se presenta en sus valores, dado que es un mercado libre, los precios pueden ser tanto muy bajos, sobre todo en épocas en donde los embalses presentan niveles altos de agua, como muy altos, cuando hay escasez de agua. La Figura 4 ilustra el precio de la electricidad en el sector de generación para algunos periodos del funcionamiento de la Bolsa diaria de Electricidad en Colombia. Para proteger al usuario de los precios altos, se estableció un valor de techo del valor de la electricidad en generación, denominado “precio de escasez”, el cual determina un valor límite. Al superar el valor límite, se cubre la diferencia a través de un fondo previamente recaudado a los usuarios como parte de la tarifa eléctrica, denominado “Cargo por Confiabilidad”. Así pues, se puede entender en el caso del corto plazo, los usuarios pagan en las facturas de electricidad, un valor agregado, que cubre los altos precios de electricidad en caso de que se presenten, y no se vean reflejados en sus facturas. El “Precio de Escasez”, es calculado por el administrador del sistema, conocido en Colombia como XM, utilizando componentes como el valor del combustible fósil más costoso, asumiendo que sea necesario utilizar plantas termoeléctricas que utilizan dicho combustible, ilustrado en publicaciones como en [9].

IV. PLANEAMIENTO EN EL MEDIANO PLAZO

Con el fin de suministrar energía eléctrica a los diferentes usuarios, en Colombia se firman contratos de mediano plazo entre generadores y comercializadores, abarcando periodos principalmente de un año de suministro eléctrico a través de

Contratos Bilaterales. Dicho mercado es el de mayor proporción tal como se ilustra en la Figura 3. Comercializadores que atienden grandes cantidades de usuarios, compran electricidad a los diferentes generadores en diferentes modalidades de contratos, como lo son “Pague lo Generado”, y “Pague lo Consumido”, logrando no solo asegurar el suministro eléctrico en periodos de mediano plazo, si no adicionalmente, a precios competitivos, buscando también tarifas económicas para los consumidores.

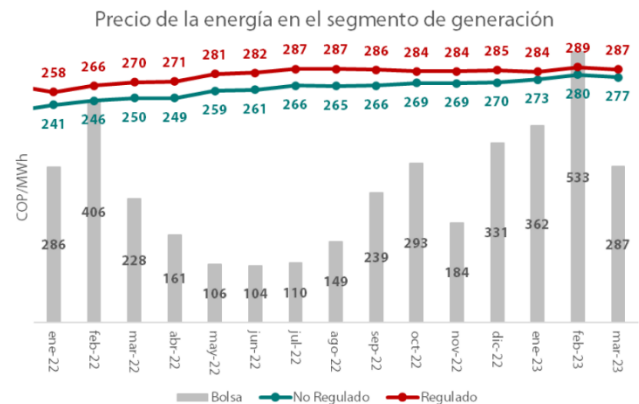


Fig. 4. Precio de la electricidad en el segmento de la generación según [5].

La ventaja del mercado bilateral, se basa en no solo asegurar la electricidad en el mediano plazo, si no adicionalmente, permitir precios de dicha electricidad en valores bajos y estables. La estabilidad en el precio de la electricidad, asegura una confiabilidad en términos económicos para que los usuarios puedan pagar sus facturas del servicio eléctrico, liberando los precios de la incertidumbre por la volatilidad que se presenta en el Mercado del Bolsa diaria, y es por ello que la mayor parte de compra y venta de energía eléctrica se realiza a través de los Contratos Bilaterales como se ilustra en Figura 3.

La desventaja a resaltar en el mercado de Contratos Bilaterales, es la presencia de variados tipos de contrato que no permite ilustrar claramente la predicción de los precios de la electricidad. El operador del mercado XM, reporta hasta 58 tipos de contrato para el año 2020, presentando así, una gran complejidad en la administración de dichos contratos.

V. PLANEAMIENTO EN EL LARGO PLAZO

El planeamiento energético a largo plazo es de gran importancia para lograr los cambios necesarios relacionados a diferentes metas, como la reducción del impacto climático, uso incentivo de energías limpias y renovables, así como el suministro de energía para futuras generaciones. En Colombia, se tienen diferentes retos en el planeamiento de largo plazo en el sector eléctrico, como lo es: a) la diversificación de la matriz energética, para no tener una alta dependencia del agua almacenada en grandes embalses, b) el uso de fuentes de energía no convencionales (FENC), c) sostenibilidad energética, entre otros, como es ilustrado en reportes técnicos como en [10].

Por su ubicación geográfica, Colombia cuenta con diversos e importantes potenciales energéticos con fuente energéticas

como: a) energía solar, al tener una alta radiación solar a lo largo y ancho del territorio colombiano, durante todos los días del año; b) energía eólica a presentar fuertes vientos al norte del país en la península de Guajira, tanto a nivel continental, como en el mar Atlántico con opción energía eólica marina (offshore); c) energía a partir de la biomasa, siendo un país agrícola, con la presencia de diferentes pisos térmicos, que brindan gran variedad de residuos vegetales; d) importantes reservas de carbón, que puede ser utilizado en escenarios de crisis energéticas, c) alto potencial energético a partir de la hidroelectricidad, de acuerdo a lo ilustrado en el informe técnico en [11].

En aras de cumplir con dichos objetivos, desde el año 2008, viene funcionando el denominado “Cargo por Confiabilidad”, el cual pretende no solamente recaudar dinero para enfrentar el precio de la electricidad cuando supera el “Precio de Escasez”, tal como fue explicado en la sección III, sino en forma adicional, financiar nuevos proyectos de generación en el largo plazo. El Cargo por Confiabilidad establece la realización de una subasta para seleccionar proyectos de generación, estableciendo contratos de largo plazo, y de este modo, asegurar la financiación necesaria para instalar no solo nuevas plantas de generación, sino ampliaciones y/o repotenciación de proyectos ya existentes. La realización de las subastas tiene un periodo de aproximadamente cuatro años, tiempo en el cual se pretende instalar proyectos de todo tipo de tecnología, como sistemas fotovoltaicos, realizando contratos en el largo plazo, cubriendo periodos de hasta veinte años, pretendiendo abarcar grandes proyectos que necesitan, periodos importantes de construcción y recuperación de la inversión. En la Figura 5, se ilustra la asignación realizada en la más reciente subasta, hecha en febrero del 2024, en donde se asignó 16329,7 MW de energía con plantas fotovoltaicas, 3991,5 MW de nuevas plantas eólicas, 1018,84 MW con plantas térmicas (especialmente usando gas natural), y 2527,55 MW con plantas hidráulicas, para un total de 23867,6 MW, tal como se ilustra en la Figura 5.

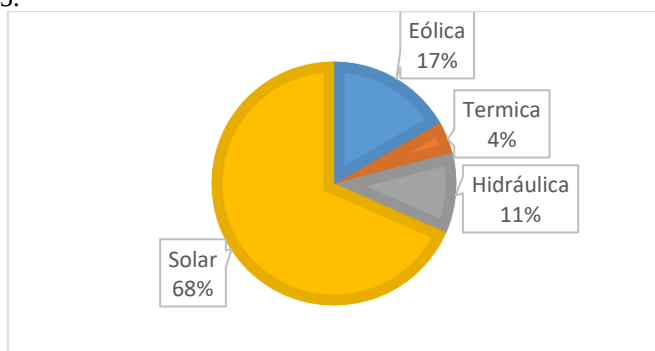


Fig. 5. Capacidad asignada en el año 2024 según datos UPME.

Los cálculos realizados por la UPME reportados en el Informe Técnico en [12], presenta una matriz del sector eléctrico para el año 2032 tal como se ilustra en la Figura 6, llegando a una Capacidad instalada total de 42737,86 MW, en donde las plantas hidroeléctricas instaladas representarán un 35%, los sistemas solares representarán un 39%, las plantas térmicas representarán un 17%, y los sistemas eólicos representarán un 9%. Dichos datos, ilustran un panorama en donde se disminuye la importancia de las plantas hidroeléctricas, aumentando en

forma considerable el interés sobre los sistemas fotovoltaicos y una mesurada consideración sobre los sistemas eólicos. Si se consideran estas últimas tres fuentes naturales como energías renovables, se tendrá así una matriz energética del sector eléctrico con un porcentaje del 87% a partir de dichas fuentes, convirtiendo a Colombia en uno de los países con los mejores indicadores en el uso de energías limpias. Así pues, se baja la dependencia de los sistemas de generación hídrica, alejándose de los escenarios de crisis energéticas por la escasez del agua, a una dependencia del sol, sabiendo que esta fuente solo está por unas horas en el día, y precisamente no está presente cuando la demanda aumenta considerablemente, dado que alrededor de las 8 pm, se llega a los valores máximos de consumo.

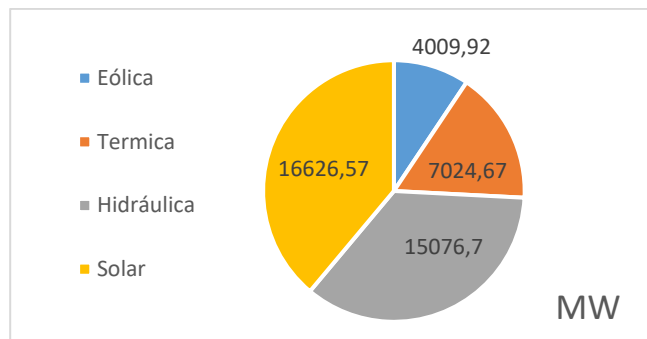


Fig. 6. Matriz energética futura en el sector eléctrico según [10].

La UPME tiene como tarea la realización de diferentes escenarios futuros, considerando diferentes variables como lo son: a) aumento de la población, b) proyección del Producto Interno Bruto, c) proyecciones de reservas de petróleo y gas natural en Colombia, d) análisis de maduración de tecnologías de generación, entre muchos otros. La Figura 7 ilustra los resultados de los diferentes escenarios del Planeamiento en el Sector Eléctrico, siendo 6 escenarios los planteados, siendo el escenario denominado como Actualización, el camino en donde se realizan las acciones menos ambiciosas, en donde se proyecta 50152,9 MW de capacidad instalada, dando importancia en mayor medida a los sistemas fotovoltaicos.

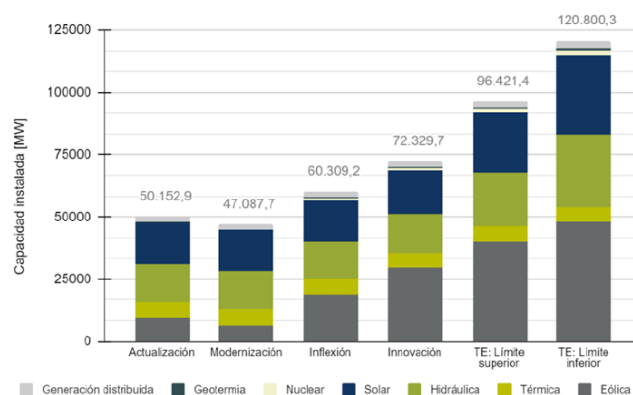


Fig. 7. Escenarios de largo plazo, fuente [12].

El escenario más ambicioso presentado por la UPME denominado como “Transición Energética – Límite inferior”, el cual es ilustrado en la Figura 8, se tiene mayor relevancia para

los sistemas eólicos, aprovechando el potencial energético en la región de La Guajira, relevando al segundo lugar a los sistemas fotovoltaicos, y en tercer lugar a las plantas hidroeléctricas. También entra a participar la energía nuclear con los sistemas a pequeña escala, y en forma adicional, pequeñas plantas en sistemas geotérmicos. Con este escenario, se releva en gran medida el uso de fósiles en la producción de energía eléctrica, pero dependiendo fuertemente de la intermitencia de los sistemas renovables.

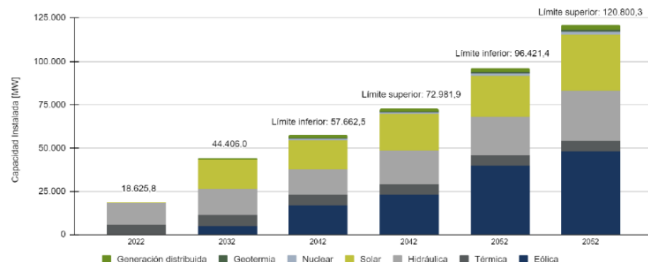


Fig. 8. Escenario Transición Energética, fuente [12].

Los datos ilustrados en el último escenario de la Figura 8, reducen fuertemente la producción de gases de efecto invernadero, tal como se ilustra en la Figura 9, logrando alcanzar los objetivos de la reducción del impacto ambiental.

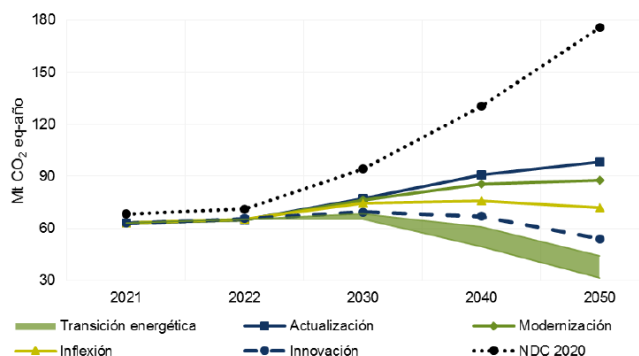


Fig. 9. Reducción emisiones, fuente [12].

VI. CONCLUSIONES

El planeamiento energético de corto, mediano y largo plazo en el sector eléctrico realizado en Colombia, ha permitido el suministro continuo del servicio eléctrico con altos índices de cobertura (en un 97%), sin presentarse ningún tipo de racionamiento desde el año 1993. Basado en lo anterior, se puede afirmar que las estrategias implementadas desde las reformas del sector eléctrico en el inicio de los años noventa, han sido acertadas, en especial cuando se han superado situaciones críticas, como las presentadas en el año 2015 e inicios del 2024, cuando se presentaron tiempos largos de escasez del agua disparando las alarmas del racionamiento eléctrico, dado la alta dependencia de las plantas hidroeléctricas.

Es de destacar la visión de la UPME, al proponer una matriz energética que utilice Fuentes de Energía No Convencionales, energías limpias, renovables y sostenibles. Sin embargo, se debe prestar atención a las debilidades del sistema, en escenarios críticos que se puedan presentar con fenómenos climáticos

como el Niño y la Niña, así como la atención de la demanda máxima en momentos de alto consumo, cuando el recurso del sol no está disponible.

Cabe ahora a los diferentes actores del sector, evaluar con detenimiento los estudios presentados por la UPME, en aras de apoyar o corregir los diferentes caminos planteados, en búsqueda de la sostenibilidad, la seguridad energética, y el alcance del menor impacto ambiental en todas las actividades relacionadas con la producción, transporte, distribución y consumo de la energía eléctrica. Se deben considerar caminos adicionales, como lo es construir conexiones internacionales con Panamá, Venezuela y demás vecinos, en aras de garantizar la seguridad energética.

REFERENCIAS

- [1] OLADE, "Manual de Planificación Energética 2017" en Publicaciones Organización Latinoamericana de Energía, 2da edición, marzo 2017, ISBN 978-9978-70-109-6
- [2] H.Rudnick and J.Zolezzi, "Electric sector deregulation and restructuring in Latin America: lessons to be learnt and possible ways forward" en IEE Proceedings - Gener Trans Distrib, Vol 148, No 2, marzo 2001. DOI 10.1049/ip-gtd:20010230
- [3] CREG, "Resolución 20 de 1996 compras de energía eléctrica en el mercado mayorista" en Publicaciones Comisión de Regulación de Energía y Gas, Bogotá D.C., Colombia, Reporte Técnico, Julio 2023.
- [4] UPME, "Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica, PIEC 2019-2023" en Publicaciones Unidad de Planeación Minero Energética, Bogotá D.C., Colombia, Reporte Técnico, Julio 2023.
- [5] XM, "Boletín Energético # 297 Seguimiento a Variables" en Publicaciones XM S.A. E.S.P., Bogotá D.C., Colombia, Reporte Técnico, mayo 2024.
- [6] CREG, "Resolución CREG 071 de 2006" en Publicaciones Comisión de Regulación de Energía y Gas, Bogotá D.C., Colombia, Reporte Técnico, Julio 2023.
- [7] XM, "Informe de Precios y Transacciones Julio 2022" en Publicaciones XM S.A. E.S.P., Bogotá D.C., Colombia, Reporte Técnico, Julio 2022.
- [8] CREG, "Resolución CREG 101 018 de 2022" en Publicaciones Comisión de Regulación de Energía y Gas, Bogotá D.C., Colombia, Reporte Técnico, Julio 2023.
- [9] UPME, "Boletín Estadístico 2018-2023-S1" en Publicaciones Unidad de Planeación Minero Energética, Bogotá D.C., Colombia, Reporte Técnico, Mayo de 2024.
- [10] UPME, "Plan Indicativo de Expansión de la Generación 2023-2037" en Publicaciones Unidad de Planeación Minero Energética, Bogotá D.C., Colombia, Reporte Técnico, octubre de 2023.
- [11] UPME, "Atlas Potencial Hidroenergético de Colombia 2015" en Publicaciones Unidad de Planeación Minero Energética, Bogotá D.C., Colombia, Reporte Técnico, 2015.
- [12] UPME, "Plan Energético Nacional (PEN) 2022-2052" en Publicaciones Unidad de Planeación Minero Energética, Bogotá D.C., Colombia, Reporte Técnico, marzo de 2024.

Estudio del uso de imágenes satelitales multitemporales y multisensor, para la identificación del cambio de cobertura a causa de la minería ilegal en el municipio de Istmina

Cáceres M. María, Autor. *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, mfcaceresm@udistrital.edu.co

Peña S. Andrea, Autor. *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, anpenas@udistrital.edu.co

Herrera E. José, Co-director. *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, jherrera@udistrital.edu.co

Valbuena G. Martha, Co-director. *Procalculo*, mvalbuena@procalculo.com

Resumen— La minería ilegal en Colombia plantea un desafío urgente con graves impactos ambientales, económicos y sociales. Este estudio evalúa la efectividad de tecnologías avanzadas de teledetección y análisis geoespacial para detectar y monitorear esta actividad ilícita en Istmina, Chocó, utilizando datos de satélites Landsat y Sentinel (2014-2023). Se aplicaron técnicas como la clasificación de cobertura del suelo y la comparación multitemporal, destacando el uso de sinergismos para mejorar la identificación de la deforestación. El objetivo es optimizar herramientas de monitoreo para apoyar la supervisión gubernamental en áreas ambientalmente vulnerables.

Palabras clave—Detección de cambios, machine learning, deforestación, imágenes satelitales, SAR.

I. INTRODUCCION

La minería ilegal en Colombia es un problema crítico con profundas implicaciones ambientales, económicas y sociales, que desafía la capacidad de las autoridades para gestionarlo de manera efectiva. Este proyecto busca identificar el método más efectivo para detectar, cuantificar y monitorear esta actividad ilícita, utilizando tecnologías de teledetección, machine learning y análisis geoespacial. Este estudio se basa en datos de sensores remotos, incluyendo imágenes ópticas y de radar de los satélites Landsat y Sentinel 1 y 2, recopiladas entre 2014 y 2023. El área de enfoque es Istmina, Chocó, una región gravemente afectada por la minería ilegal. A lo largo del proyecto, se realizaron análisis detallados de imágenes para investigar la deforestación causada por la minería ilegal en Istmina. Se aplicaron técnicas como la clasificación de cobertura del suelo y la comparación de imágenes multitemporales, integrando diferentes enfoques para obtener una visión completa de los cambios en el terreno. El objetivo principal es optimizar las herramientas de monitoreo para apoyar a las autoridades locales y nacionales, facilitando la toma de decisiones informadas y elevando la conciencia pública sobre el impacto de la deforestación generada por la

minería ilegal en esta región.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La minería ilegal en Colombia representa una grave amenaza para el medio ambiente, la economía y la sociedad, siendo una de las principales causas de deforestación y contaminación que impacta significativamente los ecosistemas locales [1]. Socialmente, esta actividad está vinculada a la presencia de grupos armados en varios municipios, operando fuera de la regulación y agravando los problemas ambientales mediante el uso de maquinaria pesada y químicos tóxicos. Un 52% de la extracción de oro aluvial se realiza en áreas protegidas, lo que incrementa la degradación ambiental [2]. Históricamente, la minería de oro aluvial ha sido un medio de subsistencia para las comunidades indígenas, pero su explotación ha crecido considerablemente, alcanzando 47,6 toneladas en 2020, impulsada por el alza en el precio internacional del oro [3]. Este aumento ha generado preocupación en comunidades de departamentos como Antioquia y Chocó, donde se concentra la mayoría de esta actividad [4]. Istmina es uno de los municipios más afectados por la deforestación y la contaminación hídrica, problemas que se han intensificado con la expansión de la minería. Las condiciones meteorológicas adversas [5] complican el monitoreo mediante imágenes satelitales ópticas, lo que subraya la necesidad de implementar nuevas tecnologías como los sensores de Radar de Apertura Sintética, que pueden ofrecer información detallada incluso en áreas con alta cobertura de nubes, mejorando así el monitoreo y la gestión de la minería ilegal en Colombia [6].

III. METODOLOGIA

A. Procesamiento Imágenes Ópticas

Para comparar multitemporalmente y detectar minería ilegal, se generaron mapas base con imágenes ópticas para visualizar la cobertura inicial del territorio y el impacto en el río Chigorodó y sus quebradas.

Se utilizaron imágenes de la constelación Landsat, disponible desde 1972 en la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos por sus siglas - USGS, seleccionando desde el año 1985 hasta el 2020.

La colección 2 de Landsat, con mejor calidad y precisión, fue elegida, priorizando el Nivel 2 (reflectancia de superficie) sobre el Nivel 1 (números digitales). A pesar de buscar imágenes con una baja cobertura de nubes, la mayoría presentaban entre 70% y 100% de nubosidad, complicando su uso sin procesamiento adicional. Dentro de las pocas imágenes de la colección 2 que permitían ver el territorio se encontraban imágenes del programa Landsat 7 las cuales presentaban fallos del Corrector de Líneas de Barrido, y las disponibles de los programas 5 y 8 tenían alta nubosidad, requiriendo mosaicos y máscaras de nubes.

Para optimizar el proceso, se diseñaron scripts en Google Earth Engine para Landsat y Sentinel. El script de Landsat buscaba imágenes de los programas 5, 7 y 8, aplicando máscaras de nubes y sombras, generando series temporales anuales y exportando las imágenes procesadas a Google Drive. El script de Sentinel-2, similar al de Landsat, buscaba imágenes desde 2017, generando series temporales y exportando las imágenes procesadas. Las imágenes seleccionadas (2014, 2017, 2020, 2023) fueron post-procesadas con ArcGIS Pro de la siguiente manera:

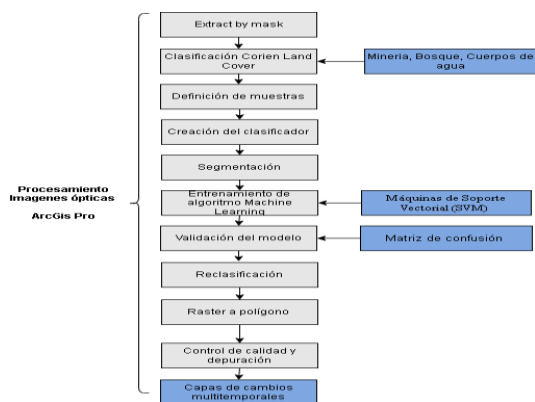


Fig. 1. Metodología de procesamiento imágenes ópticas

B. Procesamiento Imágenes Radar

Para obtener imágenes de radar precisas y confiables de la zona de interés, se implementaron correcciones utilizando los softwares SNAP y ArcGIS Pro sobre imágenes anuales del período 2014-2023 descargadas mediante el Hub de acceso abierto Copernicus de la Agencia Espacial Europea. Estas correcciones eliminaron distorsiones geométricas y topográficas, asegurando que las imágenes reflejaran con precisión la realidad. La metodología usada se ilustra en la figura 2.

C. Sinergismo

Tras obtener los resultados de las imágenes de radar y ópticas, se procede al proceso de sinergismo, que combina las fortalezas de ambas fuentes de datos para generar una representación más precisa y detallada de la zona de estudio.

El proceso comienza con la extracción de las bandas ópticas NIR, rojo y verde para representar la vegetación. Luego, se crea una imagen RGB, que se convierte al modelo HSV (Tono, Saturación, Valor) Este modelo facilita la manipulación de ciertos

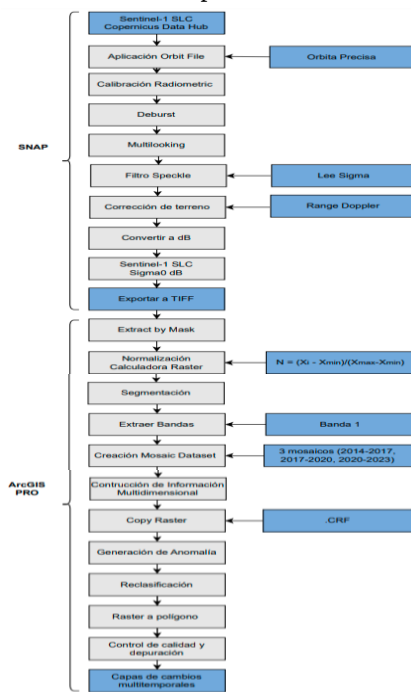


Fig. 2. Metodología de procesamiento imágenes radar

aspectos de la imagen, ya que separa el componente de intensidad (Valor) del color y la saturación. [7]. La banda de Valor en HSV es reemplazada por la imagen de radar, que agrega detalles sobre la textura del terreno. Finalmente, se reconvierte la imagen de HSV a RGB, obteniendo así una imagen compuesta más enriquecida, que combina la información espectral de las imágenes ópticas con la textura y detalles proporcionados por el radar. [7]

Con los análisis para cada año finalizados, se procede a la detección de cambios. Para mejorar los resultados, se genera una composición de NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), que compara la reflectancia de las bandas roja y NIR. Este índice es crucial para detectar cambios en la vegetación, y se genera utilizando las bandas extraídas durante el sinergismo, a través de las funciones ráster disponibles en ArcGIS Pro. [8] Los NDVI obtenidos sirven como referencia clave para los cambios detectados. Para el análisis de 2023, se utilizaron imágenes ópticas del programa Sentinel-2, que, aunque pueden presentar interferencias por la presencia de nubes, permiten un análisis general. Sin embargo, al aplicar el sinergismo para combinar los datos ópticos y de radar, las nubes afectaron la calidad de la información final. Por ello, se decidió emplear una imagen de Landsat del mismo año, logrando una representación más precisa de la zona de estudio.

Una vez completado este proceso, se utiliza la herramienta Change Detection Wizard en ArcGIS Pro para integrar la información del NDVI y realizar un análisis comparativo de los cambios a lo largo del tiempo. Este análisis se repite para cada

intervalo de años, empleando el método Pixel Value Change, que detecta cambios en el valor de los píxeles, indicando variaciones significativas en la superficie terrestre. Los resultados obtenidos muestran diferentes escalas de grises, lo que indica la magnitud de los cambios. Para mejorar la claridad, se emplea la herramienta Reclassify, estableciendo un valor mínimo de Nivel Digital, que optimiza la representación de los cambios significativos.

Finalmente, se observa la presencia de ruido en algunas zonas, por lo que se eliminan los polígonos con un área menor a 1,56 hectáreas, que corresponde a la Unidad Mínima Cartografiable para una escala de 1:25000[9].

IV. RESULTADOS

Los resultados en cuanto a los procesamientos de imágenes ópticas, dado que la zona de estudio se caracteriza por una alta presencia de nubes, el procesamiento y análisis de las imágenes satelitales requirió técnicas específicas para minimizar estas interferencias. Empleando la plataforma Google Earth Engine, se obtuvieron resultados significativos a partir de 2014, año en que la calidad de las imágenes mejoró considerablemente, permitiendo una observación más precisa de los cambios en la cobertura del suelo. Sin embargo, las imágenes correspondientes a los años 2014, 2017 y 2020, capturadas por el satélite Landsat 7, presentaron distorsiones debido a errores inherentes en los datos. Estos errores fueron parcialmente corregidos mediante la combinación de bandas (5, 4, 3), lo que permitió una visualización adecuada de las zonas de suelo desnudo.

A pesar de estos ajustes, se identificó una degradación notable en la calidad de la información proporcionada por el programa Landsat para el año 2023, lo que motivó la transición a datos del satélite Sentinel 2, conocido por su mejor resolución espacial. No obstante, la presencia de nubes en las imágenes de Sentinel 2 añadió complejidad al análisis, afectando la identificación precisa de las áreas impactadas por la minería.

La precisión de las clasificaciones realizadas fue evaluada mediante matrices de confusión, obteniéndose altos índices de concordancia entre las clasificaciones del modelo y las observaciones reales. Los índices de Kappa registrados para los diferentes años (2014, 2017, 2020, 2023) oscilaron entre 0.70 y 0.94, lo que indica desde una concordancia sustancial hasta una casi perfecta. Sin embargo, se observaron errores sistemáticos en la clasificación de cuerpos de agua y suelo desnudo, lo cual puede ser atribuido a la similitud espectral entre estas clases y a la resolución limitada de las imágenes. Además, la posible contaminación de cuerpos de agua debido a actividades mineras podría haber influido negativamente en la precisión de la clasificación. Para mejorar la interpretabilidad de los resultados, se simplificaron las clases a "Bosque" y "No Bosque". Esta simplificación facilitó un análisis más homogéneo y permitió identificar de manera más clara las tendencias en la pérdida o el incremento de áreas boscosas a lo largo del tiempo. La verificación de esta simplificación se realizó utilizando matrices de confusión y los índices Kappa obtenidos durante la validación del algoritmo de Máquinas de

Soporte de Machine Learning, cuyos valores para cada uno de los periodos analizados muestran la correcta decisión en la elección del algoritmo y su relación con la realidad. [10]

Ahora bien, frente a las zonas de cambios producto a este procesamiento de imágenes ópticas la cual se ilustra en la figura 3. Se destaca la relevancia de las reclasificaciones previamente mencionadas, ya que fueron fundamentales para la identificación precisa de las zonas de bosque y no bosque, así como para determinar las áreas de vegetación afectadas por la actividad minera.

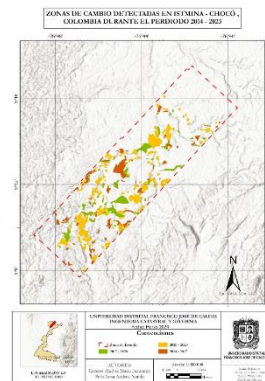


Fig. 3. Zonas de cambio obtenidas mediante imágenes ópticas

Una vez obtenidas las áreas representadas en el mapa anterior. Se evaluaron las condiciones del terreno y los cambios en la cobertura vegetal, los cuales se resumen en la siguiente gráfica:

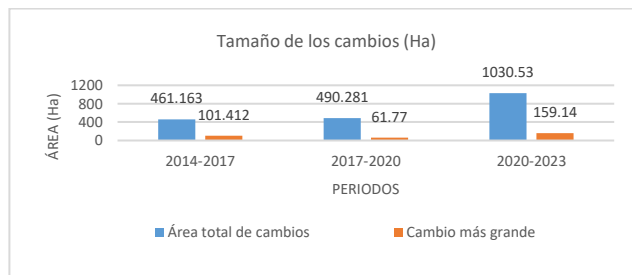


Fig. 4. Tamaño de los cambios obtenidos mediante fuentes ópticas medido en Hectáreas

La gráfica evidencia que el tercer período presenta el mayor grado de deterioro en la cobertura vegetal, atribuible en gran medida a la actividad minera. Este análisis se ve afectado por la clasificación de "Nubes" y "Sombras" como "No bosque" en el año 2023, utilizando imágenes del satélite Sentinel, lo que introduce una discrepancia en comparación con los otros dos períodos, los cuales muestran una tendencia de crecimiento lineal. Sin embargo, se observa que durante el primer período se registró una pérdida significativa de cobertura vegetal en una única zona de 101 hectáreas, un valor notablemente alto para un período tan breve. En el segundo período, aunque los cambios individuales no son de gran magnitud, el cambio total acumulado asciende a 490 hectáreas, lo que refuerza la tendencia continua de pérdida de vegetación como consecuencia de las actividades mineras.

Por otro lado, para generar los resultados del procesamiento de imágenes de radar Sentinel 1. Inicialmente, se realizó una depuración de los datos obtenidos, eliminando alteraciones asociadas al relieve en las cuencas de recursos hídricos, que habían generado detecciones incorrectas en el mapa preliminar. Esta depuración fue esencial para mejorar la precisión en la identificación de zonas afectadas. El análisis de las capas de detección de anomalías reveló la presencia de numerosos cambios en la parte inferior de las capas, identificados como posibles falsos positivos. Estos falsos positivos fueron atribuidos a factores como el relieve y las variaciones en la escala de grises, influenciados por los parámetros del radar SAR y la reflexión de la señal en la superficie. Las distorsiones en la geometría del terreno, como desplazamientos en el relieve y sombras contribuyeron a estos errores.

Para abordar esta problemática, se realizó una revisión visual exhaustiva para identificar y eliminar los falsos positivos, permitiendo la generación de un conjunto de datos más preciso y comparable. Los resultados indican que la proporción de falsos positivos en relación con el total de cambios fue considerable, representando el 34% en el primer período, el 54% en el segundo, y el 30% en el tercero. Ahora bien, la capa depurada de cambios, representada a continuación:

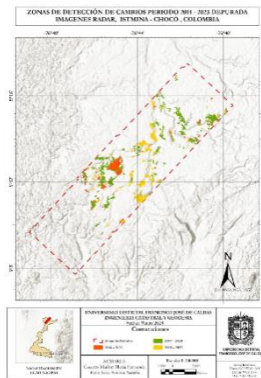


Fig. 5. Zonas de cambios obtenidas mediante imágenes radar

Sirvió como base para el análisis comparativo con otros sensores. El análisis de las áreas por período representado en la siguiente ilustración:

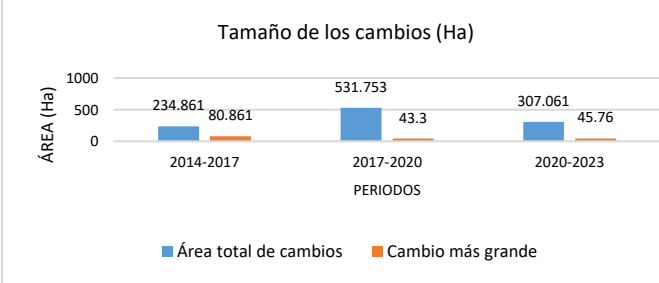


Fig. 7. Tamaño de los cambios obtenidos mediante fuentes radar medido en Hectáreas

Este análisis reveló que el segundo período exhibe el mayor grado de deterioro en la cobertura vegetal debido a la actividad minera, mientras que en el primer período se observó un cambio significativo concentrado en una zona específica, con una

pérdida de 80,9 hectáreas. Estos hallazgos subrayan la importancia de una depuración cuidadosa y la utilización de expertos en el análisis de imágenes radar para obtener conclusiones precisas y útiles para la toma de decisiones.

Entre 2020 y 2023 se detectó la mayor extensión de área afectada por la minería ilegal, mostrando un incremento significativo en comparación con períodos anteriores, mientras que entre 2017 y 2020 se registró la menor deforestación. En el primer período, la pérdida de cobertura vegetal estaba concentrada en áreas específicas, pero en los años posteriores se dispersó, evidenciando una expansión de la deforestación. El análisis de los polígonos de cambio mostró un crecimiento irregular, con una superposición mínima entre períodos, lo que indica una depuración precisa de los datos y un control visual efectivo de los cambios detectados.

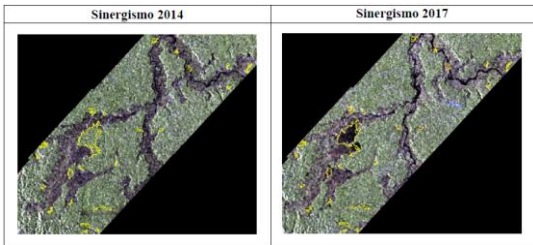


Fig. 8. Comparación de los cambios obtenidos mediante el sinergismo de imágenes, periodo 2014-2017

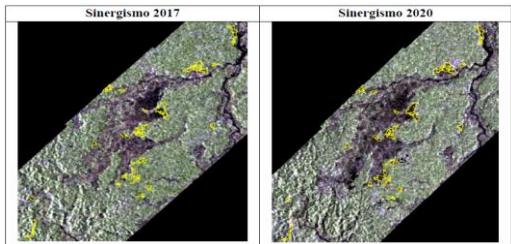


Fig. 9. Comparación de los cambios obtenidos mediante el sinergismo de imágenes, periodo 2017-2020

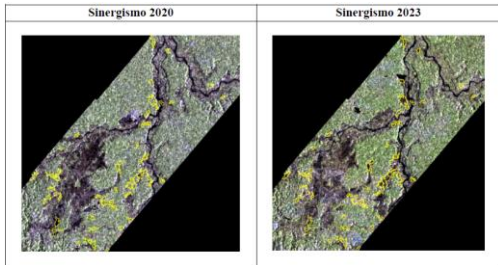


Fig. 10. Comparación de los cambios obtenidos mediante el sinergismo de imágenes, periodo 2020-2023

No obstante, se identificaron errores en el último período (2020-2023), vinculados a las condiciones de nubosidad de la imagen óptica del año 2023 y a la omisión de varios cambios no marcados, lo que podría indicar un sesgo en la herramienta de detección de cambios o en los valores utilizados para reclasificar las imágenes.

Por último, El análisis del área total de cambios, representado en la siguiente figura:

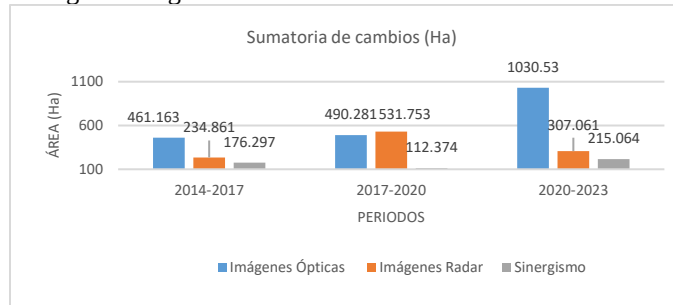


Fig. 11. Comparación de las áreas totales medidas en hectáreas de cambios obtenidas mediante los tres insumos para cada periodo

Revela patrones diferenciados en la detección de cambios en la cobertura terrestre a través de tres metodologías: imágenes ópticas, imágenes radar y sinergismo.

Las imágenes ópticas muestran un aumento progresivo en el área identificada como cambio, con el periodo 2020-2023 registrando el mayor incremento, alcanzando un total de 176.2077 hectáreas. En contraste, las imágenes radar indican que el mayor aumento en el área de cambio ocurrió entre 2017 y 2020, con un total de 490.281 hectáreas. El sinergismo, por su parte, refleja un aumento constante, siendo el periodo 2014-2017 el de mayor incremento, con 531.753 hectáreas.

Al comparar estos resultados, se observa que durante los periodos 2014-2017 y 2020-2023, los datos obtenidos a través de imágenes ópticas muestran un área de cambios considerablemente mayor en comparación con el sinergismo. Esta sobreestimación podría resultar en errores significativos, generando implicaciones económicas y de planificación para las entidades que utilizan estos datos para la toma de decisiones. En contraste, durante el periodo 2017-2020, el sinergismo exhibe un área de cambio notablemente menor que las otras dos metodologías, lo que sugiere una posible subestimación de cambios importantes o la eliminación de áreas de cambio debido a que no alcanzaban la Unidad Mínima Cartografiada.

Este análisis resalta la necesidad de considerar las limitaciones y posibles sesgos de cada método de detección para garantizar una planificación y toma de decisiones más precisa y eficiente.

V. CONCLUSIONES

El estudio proporcionó una perspectiva completa sobre la detección y monitoreo de los cambios provocados por la minería ilegal en Istmina, utilizando imágenes de sensores activos y pasivos. La fusión de textura y color a través del sinergismo mejoró significativamente la percepción de la deforestación, recomendándose como una herramienta eficaz para el mapeo de cambios en las coberturas.

La recopilación de datos enfrentó dificultades, principalmente debido a la presencia de nubes en las imágenes ópticas. A pesar de los esfuerzos para enmascarar y crear mosaicos, en 2023 no fue posible obtener imágenes sin nubes, lo que se solucionó usando datos de Sentinel 1.

Se destacó la relevancia de elegir una línea base sólida para monitorear la evolución de la minería ilegal, comenzando en 2014 debido a la disponibilidad de datos. El estudio recomendó la validación en campo para asegurar la precisión y fiabilidad de los cambios detectados en la cobertura del suelo.

La variabilidad en tonalidades de grises en imágenes de Sentinel 1 debido al relieve y ángulos del sensor puede causar errores en el análisis de datos, lo que subraya la importancia de tener en cuenta estas limitaciones al interpretar los resultados.

La presencia de nubes es un obstáculo significativo que afecta la precisión de los datos. Aunque las máscaras pueden eliminar áreas nubladas, también pueden perderse datos valiosos, lo que impacta la fiabilidad del análisis.

REFERENCIAS

- [1] UNODC, G. D. C. (2020). Explotación de oro de aluvión: evidencia a partir de percepción remota. Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC) y Gobierno de Colombia, 19.
- [2] UNODC, G. D. C. (2020). Explotación de oro de aluvión: evidencia a partir de percepción remota. Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC) y Gobierno de Colombia, 19.
- [3] Francesco D'Esposito et Auke P. Jacobs, « Auge y ocaso de la primera sociedad minera de América. Santo Domingo 1503-1520 », *Nuevo Mundo Mundos Nuevos* [En ligne], Colloques, mis en ligne le 10 mars 2015, consulté le 30 août 2024. ; DOI : <https://doi.org/10.4000/nuevomundo.67723>
- [4] Antonio Paz. (2020, noviembre 10). INFORME | El 66 % de la minería aluvial de oro en Colombia es ilegal. Noticias ambientales. <https://es.mongabay.com/2020/11/mineria-ilegal-de-oro-en-colombia-informe-2019/>
- [5] Weather Spark (2022) Istmina Climate, Weather by Month, Average Temperature
- [6] Yan, G. (1993). On the use of Radarsat-1 For Monitoring Malaria Risk in Kenya.
- [7] Almonacid Ramiro, C. (2012, diciembre). SCUAM. Universidad Autónoma de Madrid.
- [8] Rouse, J.W., Jr., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Prog. Rep. RSC 1978-1, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station, 93p. (NTIS No. E73-106393).
- [9] Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2021) ELABORACIÓN DEL MAPA DE COBERTURA DE LA TIERRA ESCALA 1:25.000, Código: IN-GAG-PC07-04
- [10] Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159–174.

A Risk assessment approach methodology to score vulnerabilities in airworthiness systems.

Wilmar N. Rengifo*, Elvis E. Gaona†

*Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia

Email: egaona@udistrital.edu.co, wnrengifog@udistrital.edu.co

†Maestría en Ciencias de la Educación y las Comunicaciones

Abstract—This article addresses the issue of vulnerabilities in navigation and telemetry systems of remotely piloted aircraft (RPA) in Colombia. A review of the RPA database maintained by UAEAC reveals that 65% of registered RPA in Colombia have been affected by a specific vulnerability in their GPS systems[1], in addition to other vulnerabilities in telemetry systems. To address this issue, the objective of this article is to propose a vulnerability assessment methodology for RPA related to navigation and telemetry systems.

The proposed methodology is based on the concept of security in aviation as a capability, rather than a property. This approach, as proposed by Janusz Zalewski[2], allows for a more comprehensive measurement and structuring of security in aircraft systems. The development of the vulnerability assessment methodology is structured to address all airworthiness features and accomplish various stages.

The result of proposed methodology is a hybrid risk assessment approach aimed at analyzing vulnerabilities airworthiness and telemetry systems of RPAs. By raising awareness about the lack of protocols and systems for analyzing RPA vulnerabilities, this article intends to contribute to the development of better procedures in the industrial, scientific, and commercial areas.

Index Terms—Risk assessment; vulnerabilities; RPA's; P.A.S.T.A; airworthiness; telemetry

I. INTRODUCTION

This article presents a hybrid methodology for addressing vulnerabilities in airworthiness and telemetry systems of Remotely Piloted Aircrafts (RPA). The research background includes a review of various methodologies that are oriented towards risk assessment, including vulnerability analysis and penetration testing. In the materials and methods section, we outline our proposed approach, which incorporates concepts that are specifically tailored for vulnerability analysis in both telemetry and airworthiness systems. Finally, we provide a brief summary of an experiment conducted to analyze vulnerabilities, along with a scoring and mitigation strategy. This methodology has the potential to enhance the security of RPAs, ensuring their safe and effective operation in several applications.

II. RESEARCH BACKGROUND

As UAV technology becomes increasingly important for industry and civilian purposes[3], ensuring operational safety has become a critical issue for both operators and non-users. Missed operations or deliberate external attacks can affect privacy, geo-data, physical buildings, and vehicle integrity.

In light of these concerns, it is necessary to propose an analytic methodology for analyzing, tracking, and evaluating unsafe operations and conditions in UAVs. This would enable us to identify risks inherent to these systems and propose ways to mitigate them.

There are currently many methodologies available to test the vulnerability of a system in a controlled environment, collect data, evaluate it, and minimize unsafe conditions. These methodologies are known as penetration test methodologies[4]. They offer a structured way to test the IT systems, including hardware, software, and people operation, to identify any flaws or weaknesses in any of the layers that interact in the operation of a system[5].

Using a penetration test methodology to analyze vulnerabilities in a system has many advantages. From the business perspective, it can minimize or avoid financial loss and lead to certifications of quality, safety, and privacy, making the operation trustworthy for potential clients. Furthermore, knowing the safety status of our systems allows us to make decisions about future investments and upgrades in UAV systems[6].

From an operational perspective, isolating and analyzing vulnerabilities provides complete control over the flow of commands, sensitive information, and airworthiness data through the different layers of UAV operation. Valuing the impact of vulnerabilities enables us to propose strategies for mitigation or even removing the unsafe condition.

However, while many methodologies are geared towards computer-centered systems, such as Information Systems, database access systems, and server-centered systems, there are currently no standard methodologies oriented towards UAV systems. As UAVs deal with data and control links mediated by auth protocols, privileges for accessing data, and communication protocols for transmitting data, we can apply a penetration test methodology that takes into account the architecture of UAV systems, along with vulnerability risk analysis.

Thus, it is necessary to select the most suitable methodology for implementation. In this study, we will explore four methodologies that meet the objective of testing security requirements related to security properties like confidentiality, integrity, availability, authentication, authorization, and non-repudiation. These methodologies are ISSAF, OSSTMM, PTES, MSF, and PASTA[7].

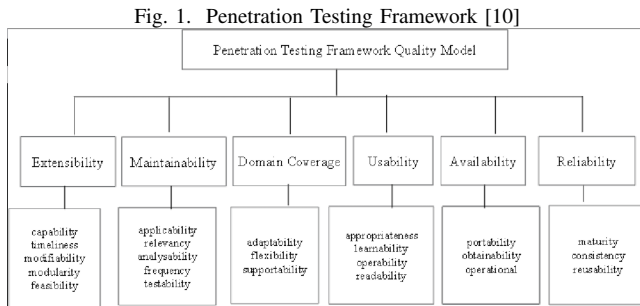
ISSAF (Information System Security Assessment) is a gen-

eral framework for articulating a more specific methodology. It is geared towards analyzing interactions over networks or systems connections like databases or web-based apps. Although it is no longer maintained, it can serve as a starting point for creating a specialized basis for any methodology oriented towards vulnerability analysis[8].

OSSTMM (Open Source Security Testing Methodology Manual) is more similar to a manual and is not specific to penetration testing. It is a comprehensive handbook that applies to all technical security standard tests. It covers six security areas: Information Security, Process Security, Internet Technology Security, Communications Security, Wireless Security, and Physical Security[9].

To determine the most suitable methodology for analyzing vulnerabilities in airworthiness and telemetry systems, we will compare the quality models of each methodology. The Penetration Testing Framework Quality Model will be used, taking into account the most relevant feature in each methodology.

We will assess the key quality indicators of Penetration Testing Frameworks. These indicators are crucial for evaluating the effectiveness and reliability of those in conducting comprehensive security assessments Fig 1.



Based on this analysis, PASTA is the most suitable methodology to apply, despite a lack of domain coverage. In the following chapters, we will implement adaptations to complement this methodology. The comparison of methodologies based on the quality model and adaptability to airworthiness systems is presented in Table 1.

III. MATERIALS AND METHODS

To develop a roadmap for analyzing vulnerabilities, it is necessary to define clear and concise objectives, create an architecture overview, decompose the application, identify threats, document threats, and rate threats[11]. With this roadmap, tasks can be formulated in a linear manner, taking into account the resources needed for each one and the resulting product.

Using the PASTA approach[12], resources and products will be referred to as inputs and outputs, respectively, and stages. Since we will be dealing with both hardware and software components, the PASTA methodology will serve as the basis for implementing the aforementioned stages:

1) Define device

a) Inputs:

- i) Functional requirements

- ii) Risk Impact Overview

- iii) Device or component features.

b) Outputs:

- i) Device features chart:

- ii) Technical features

- iii) Communication features

- iv) Airworthiness features.

2) Define technical scope

a) Inputs:

- i) Device features chart

b) Outputs:

- i) Use cases

- ii) Data features chart

- iii) Com protocols chart

3) Device decomposition

a) Inputs:

- i) Use Cases

- ii) Data features chart

- iii) Com protocols chart

b) Outputs:

- i) Operative flowchart

- ii) Data flowchart

- iii) Use cases for roles

4) Threat analysis

a) Inputs:

- i) Operative flowchart

- ii) Data flowchart

- iii) Lit review - database of known vulnerabilities

b) Outputs:

- i) List of types of attack

- ii) List of attack agents

- iii) List of entry points. Device decomposition

- iv) Use Cases

- v) Data features chart

- vi) Com protocols chart

- vii) Operative flowchart

- viii) Data flowchart

- ix) Use cases for roles

5) Vulnerability analysis

a) Inputs:

- i) List of types of attack

- ii) List of attack agents

- iii) List of entry points.

b) Outputs:

- i) Enumeration of vulnerabilities

- ii) List of attack scenarios

- iii) Scoring the vulnerability impact

6) Attack modeling

a) Inputs:

- i) Data flowchart

- ii) Operative flowchart

- iii) List of entry points.

TABLE I
METHODOLOGIES COMPARISON.

Methodology	Maintainability	Extensibility	Domain Coverage	Usability	Availability	Reliability	Airworthiness Suitable
ISSAF	NO	NO	YES	YES	YES	NO	NO
OSSTMM	YES	NO	YES	YES	YES	YES	NO
PTES	NA	YES	NO	YES	NO	YES	YES
PASTA	YES	YES	NO	YES	YES	YES	YES (Adapting)

b) Outputs:

- i) Device features chart.
- ii) List of types of attack
- iii) List of attack agents
- iv) List of entry points.
- v) Attack tree mapping
- vi) Exploits
- vii) Attack vectors

7) Risk and impact analysis

a) Inputs:

- i) Attack tree mapping
- ii) Exploits
- iii) Attack vectors

b) Outputs:

- i) Risk profile: description of the risks and business impacts.
- ii) Quantitative and qualitative risk analysis
- iii) Threat matrix
- iv) Risk mitigation strategies

A. Stages

As a proactive methodology[13], the objective of the stages mentioned above is to analyze both historical and real-time information about threats and propose strategies for mitigating not only actual threats but also potential future threats scenarios. We will cover each stage by selecting the main objective and the specific tasks, as well as the main process in each stage.

1) *Define device*: This approach allows for a more targeted analysis and subsequent architectural development. The main goal at this stage is to obtain a broad overview of the selected element, including a comprehensive list of its airworthiness features as well as its data and communication system characteristics.

In an ideal scenario, the following features, as outlined in Table 2, would be considered:

TABLE II
DEVICE CHARACTERIZATION

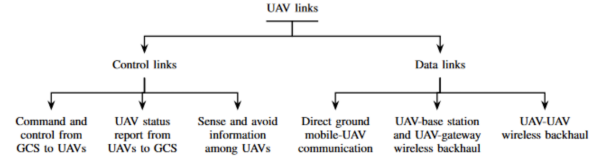
ITEM	DESCRIPTION
Model Number	
Serial Number	
Last Maintenance Date	
Airworthiness Certification	
Com Frequency	
Type Of Data	
Dependence On System	
Airworthiness Function	

This table serves as a starting point for the analysis process, providing a methodology to follow. It is essential to also take historical technical maintenance information into account, if available. The Federal Aviation Administration (FAA) recommends implementing a Periodic Maintenance Inspection (PMI) protocol to address potential failures [14]. This historical data helps to gauge the operational health of the device and estimate its lifespan.

2) *Define technical scope*: In the stage it is crucial to establish and outline the architecture of the component being analyzed. This process involves identifying the entry points of information and determining the nature of the data, such as multimedia, geodata, imagery, or control data. By analyzing these aspects, we can assess the value and sensitivity of the information involved.

Another key consideration is defining the type of links present, whether they involve control data or control links. This classification can be illustrated as depicted in Figure 2:

Fig. 2. Data links classification [15]



Additionally, it is essential to define the use cases and identify the actors involved in operating them. Flowcharts and Unified Modeling Language (UML) can be valuable tools in visualizing the outputs during this stage. It is important to note that actors are not solely limited to individuals controlling the UAV; they can also include parent systems that manage the device or receive data from it. In these flowcharts, nodes and interactions with other layers or systems should be represented to identify potential points where information could be obtained or compromised.

3) *Device decomposition*: The stage of defining the technical scope necessitates a structured analysis of the device, considering its relationship with the larger system it belongs to. To accomplish this, it becomes essential to employ a method for decomposing and analyzing the various layers and subsystems within the component. A crucial aspect of this process involves functional decomposition, which entails breaking down the device based on its specific type. This is an area where the expertise of a specialist is invaluable in guiding the decomposition process effectively.

4) *Threat analysis*: In the threat analysis stage, it is crucial to conduct research on the technical history of the device

or system under examination, including analyzing incidents related to the system in other UAVs. While there is no need to report incidents or accidents of RPAs, some companies and civil aircraft regulation departments have started developing historical repositories and databases about incidents and accidents involving UAVs[16]. However, some of these repositories may not be focused on technical details and may be limited to a specific country or region. Nevertheless, these data sources can aid in identifying attack scenarios, affected assets, and threatening agents. Some of those repositories are:

- 1) <https://asrs.arc.nasa.gov>
- 2) <https://dronewars.net>
- 3) <https://www.tc.gc.ca>
- 4) <https://www.atsb.gov.au>

In addition to analyzing incidents related to the system in other UAVs, it is important to conduct research in other industries and technology areas that use the same technology. For example, RPAs use Linux and Unix embedded server systems for data control and transmission[17]. Therefore, the vulnerability level of these systems depends on how the servers are configured and their methods for interchanging security keys. Since the likelihood of accessing the system without authorization is proportional to that of accessing a Linux server, an attacker can use exploit attacks that are common for Linux systems.

5) *Vulnerability analysis*: In the task of organizing and evaluating the collected information, it is important to start by enumerating the potential threat agents and their respective environments. To effectively classify these agents, the following criteria should be considered: source, agent, motivation, intention, and impact [18]. These criteria serve as valuable parameters for assessing and categorizing the threat agents in a structured manner:

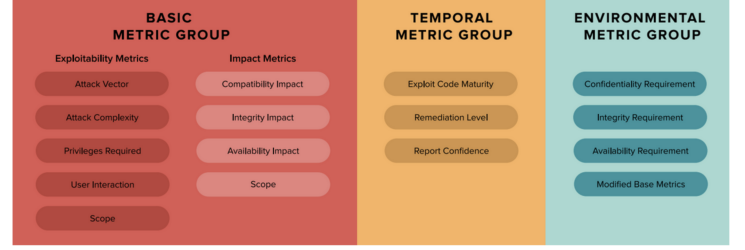
- 1) Threat source: The origin of threat either internal or external.
- 2) Threat agents: The agents that cause threats and we identified three main classes: human, environmental and technological.
- 3) Threat motivation: The goal can be malicious or non-malicious
- 4) Threat intention: The intent can be intentional or accidental.
- 5) Threats impacts: The possible consequences of the attack.

In our proposed model, we employ a scoring method to assess the vulnerabilities identified in the previous stage. Specifically, we utilize the Common Vulnerability Scoring System (CVSS) V3.0, which quantifies the level of risk associated with each vulnerability. CVSS V3.0 comprises three types of metrics: base, temporal, and environmental metrics Fig 3.

Each metric within CVSS 3.0 has its own scale of evaluation, tailored to the specific concept being assessed.

- 1) Attack Vector: This score depends on the distance from the attacker, the threat will be higher if the attacker can

Fig. 3. CVSS 3.0 metric groups.[19]



perform the exploit in remotely way, it will be lower if the attacker needs to execute the exploit directly connected to the system. Values: Network(N), Adjacent(A), Local(L), Physical(P),

- 2) Attack Complexity: This score depends on the expertise or complexity of the exploit, the bigger the effort and resources to be performed the exploit requires , the lower the score will be . Values: Low(L), High(H)
- 3) Privileges Required: This score depends on the access level for implementing the exploit. What this means is, if the attacker needs to be authenticated in the system, this will lower the score because there is a limitation to applying it, if the attacker can apply the exploit without having privileges the scoring will go higher. Values: None(N), Low(L), High(H)
- 4) User Interaction: It depends on the number of people involved in the exploited. If a team of many people is needed, the scoring will be lower than if it can be implemented by just one person. Values: None(N), Required(R)

Along this base metrics we will use temporal and environmental metric to get a more defined score. So we are going to use following scheme for scoring the levels of risk Fig. 4:

Fig. 4. CVSS 3.0 scoring diagram.[19]

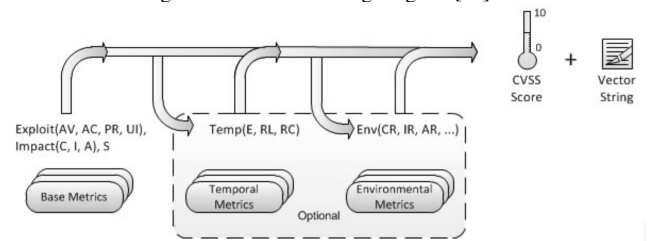


Figure 7: CVSS 3.0 scoring diagram

Source: [24]

Then we can get the Attack Vector as follows: Network, Attack Complexity: Low, Privileges Required: High, User Interaction: None, Scope: Unchanged, Confidentiality: low, Integrity: Low, Availability: None” and no specified Temporal or Environmental metrics would produce the following vector: AV:N/AC:L/PR:H/UI:N/S:U/C:L/I:L/A:N

The specific value has a constant which is used in the formulas, and those can be found on <https://nvd.nist.gov/vuln-metrics/cvss> Table 3. Now according to the qualitative severity rating scale the score of the attack vector is: 3.8 (LOW)

TABLE III
CVSS 3.0 SCORING TABLE

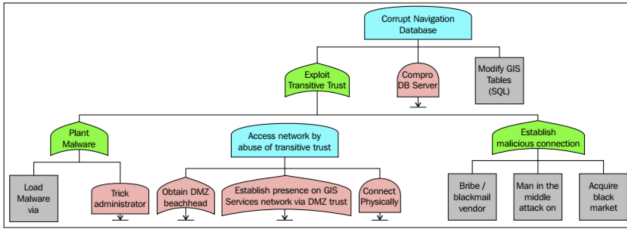
Rating	CVSS Score
None	0.0
Low	0.1 - 3.9
Medium	4.0 - 6.9
High	7.0 - 8.9
Critical	9.0 - 10.0

Using this scoring method, we can prioritize the vulnerabilities based on the level of risk they pose, and focus on mitigating the most critical ones first.

6) *Attack modeling*: Now is time to implement the way we will attack the surfaces or devices we identified as weak or vulnerable. So as PASTA methodology states we will use attack trees to trace and document all aspects in this stage. First of all let's check how an attack tree is structured in the following image.

For developing an attack tree we need to go over all layers of the architecture of the system, so using the collected information until this stage will make it easier to structure a known attack, for instance, we will check next tree extracted from "Practical Internet of Things Security"[20] where a risk management tool "AMENAZA"[21] is used for developing an attack tree Fig. 5:

Fig. 5. Attack tree full. [20]



At the top of the tree will be the main goal, in this case, we will redirect the UAS, we will connect the different methods (AND SHAPE) we can develop to reach the main goal, as it can appreciate we can append another tree to a method, so we are going to focus on corrupt navigation database to achieve the main goal.

IV. CONCLUSION

In conclusion, this article presents a well-structured approach for recognizing, scoring, and analyzing insecure conditions in Unmanned Aerial Systems (UAS). By focusing on a key device like the GPS, the scoring methodology demonstrates its consistency in identifying unsafe conditions. This provides a valuable guide for security professionals to conduct comprehensive penetration testing, enabling them to gain a holistic understanding of potential vulnerabilities and develop effective mitigation strategies.

Furthermore, it is worth highlighting that the Colombian government, as emphasized in CONPES, recognizes the significance of studying security factors in new digital technologies. The use of UAS, including Remotely Piloted Aircraft (RPAs),

poses a cybersecurity challenge in line with Colombian regulations. The utilization of RPAs has gained considerable traction, making airspace and aircraft technology a political and economic concern in many Latin American countries. While drone regulations are still in early stages, this proposal offers a fresh perspective on security assessment systems and procedures. It also serves as a foundation for implementing reporting systems for incidents and accidents involving UAVs and RPAs in Colombia, akin to reporting systems for conventional aircraft. Moreover, it highlights the need for proper regulation for operators and pilots, including the responsibility factor for UAV and RPA manufacturers and distributors, which is currently absent in existing Colombian regulations.

It is crucial to emphasize the importance of validating this proposed methodology by applying it to other operational and security layers. Reporting on its effectiveness in reducing unsafe operations and improving protocol organization will further enhance its practical application and inform future regulatory measures.

V. ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the CIDC (Centro de investigación y Desarrollo Científico) of Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia, as well as the GITUD research group, for very helpful discussions and comments.

REFERENCES

- [1] Explotadores Registrados - Aerocivil. Recovred marzo 26, 2022 de <http://www.aerocivil.gov.co/servicios-a-la-navegacion/sistema->
- [2] A. J. Kornecki and J. Zalewski, "Software Security in Aviation. pp. 1-2, 2015"
- [3] "Hype Cycle for Emerging Technologies, 2019 - Gartner." 6 ago. 2019, <https://www.gartner.com/en/documents/3956015/hype-cycle-for-emerging-technologies-2019>. Accessed April 13rd. 2020
- [4] C. T. Phong and W. Q. Yan, "An overview of penetration testing," *Int. J. Digit. Crime Forensics*, vol. 6, no. 4, pp. 50-74, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.4018/ijdcf.2014100104>
- [5] S. M. S. M. S. CHAKRABORTY, and W. HASAN, "A Comparative Overview on Penetration Testing," no. September, pp. 25-28, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.15224/978-1-63248-069-9-17>
- [6] C. T. Phong and W. Q. Yan, "An overview of penetration testing," *Int. J. Digit. Crime Forensics*, vol. 6, no. 4, pp. 50-74, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.4018/ijdcf.2014100104>
- [7] M. Felderer, M. Büchler, M. Johns, A. D. Brucker, R. Breu, and A. Pretschner, "Security Testing: A Survey," *Adv. Comput.*, vol. 101, pp. 1-51, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/bs.adcom.2015.11.003>
- [8] Information System Security Assessment Framework (IS-SAF)," <https://www.futurelearn.com/courses/ethical-hacking-an-introduction/0/steps/71521>. 13 abr. 2020
- [9] "OSSTMM - Open Source Security Testing ... - SecuriTeam." 27 ago. 2003, <https://securiteam.com/securityreviews/51p0l20auq/>. Se consultó el 13 abr. 2020
- [10] A. Shanley and et al Johnstone, "Selection of penetration testing methodologies: A comparison and evaluation," *AISMC - Aust. Inf. Secur. Manag. Conf.*, vol. 2015, pp. 65-72, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.4225/75/57b69c4ed938d>
- [11] P. Mani and M. Venkat, "A risk-centric defensive architecture for threat modeling in e-government application," *Electron. Gov. an Int. J.*, vol. 14, no. 1, p. 1, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/EG.2017.10008841>
- [12] T. Ucedavelez, "Real World Threat Modeling Using the PASTA Methodology"
- [13] K. Wackwitz and H. Boedecker, "Safety Risk Assessment for UAV Operation," p. 16, 2015
- [14] A. C. Watts, "Unmanned Aircraft System (UAS)," vol. 76136, no. 817. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3451039>

- [15] A. C. Watts, "Unmanned Aircraft System (UAS)," vol. 76136, no. 817. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3451039>
- [16] G. Wild, J. Murray, and G. Baxter, "Exploring Civil Drone accidents and incidents to help prevent potential air disasters," *Aerospace*, vol. 3, no. 3, pp. 16–17, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2015.09.180>
- [17] "OSSTMM - Open Source Security Testing ... - SecuriTeam." 27 ago. 2003, <https://securiteam.com/securityreviews/5lp0l20auq/>. Se consultó el 13 abr. 2020
- [18] M. Jouini, L. B. A. Rabai, and A. Ben Aissa, "Classification of security threats in information systems," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 32, pp. 489–496, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.452>
- [19] "Industrial CVSS: alternative calculations for different needs" <https://www.incibe-cert.es/en/blog/industrial-cvss-alternative-calculations-different-needs>. Accessed April 24th 2020
- [20] B. Russell and D. Van Duren, *Practical Internet of Things Security: A Practical, Indispensable Security Guide that Will Navigate You Through the Complex Realm of Securely Building and Deploying Systems in Our IoT-Connected World*
- [21] Amenaza Technologies, *SecurITree for Attack Tree analysis*. <https://www.amenaza.com/>. Accessed May 8th. 2020

Gestión Energética de clústeres de Microrredes Eléctricas basada en Dinámicas Epidemiológicas

Nelson Castañeda-Arias, Nelson Díaz Aldana, and Andrés Jutinico Alarcón

Abstract— This document introduces a conceptual model for the energy management of a multi-microgrid system based on epidemiological dynamics. The proposed strategy conceives a multi-microgrid system as a group of individuals interacting within environments susceptible to infectious diseases. Therefore, a discrete-event system is proposed, where each microgrid could transition among several states related to epidemiological states based on the SEIR-V model.

Depending on their internal generation and demand, a microgrid could be in a state that influences the connected ones. In such cases, the connected microgrids trade energy in a different epidemiological state. The main idea is to improve the performance of the system in order to ensure availability and enhance the resilience of the overall system

Resumen: En este documento se presentan las definiciones, perspectivas y modelo conceptual de una estrategia para la gestión energética de microrredes eléctricas interconectadas en un clúster aprovechando la dinámica epidemiológica del modelo SEIR-V

Para la operación de la estrategia se plantea un sistema de eventos discretos para cada microrred, que puede ser entendido en su conjunto como un sistema multi-agente.

El concepto utilizado busca relacionar los distintos estados epidemiológicos con estados en los que pueda entrar una microrred según la generación o demanda de potencia. En ese sentido, cuando las microrredes están interconectadas se produce un *contagio* haciendo que las microrredes interactúen modificando su dinámica interna y cambien su estado epidemiológico.

Con esta estrategia se busca garantizar la disponibilidad del recurso para todas las microrredes y la resiliencia del sistema.

Index Terms— multi-microgrids, energy management system, epidemiological dynamics, SEIR-V model

“Este trabajo es parcialmente financiado por minciencias mediante el proyecto de investigación “Gestión de energía basada en computación en la nube para la interoperabilidad entre un grupo de microrredes aisladas” en el marco del Convenio Especial de Cooperación suscrito entre UNAL, UAN y UDFJC, bajo el marco del Contrato 807040 542 de 2020.” (Corresponding author: Nelson Castañeda-Arias).

Nelson Castañeda-Arias, Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, Universidad Distrital Francisco José de Caldas (e-mail: nacastaneda@udistrital.edu.co).

Nelson Díaz Aldana, Universidad Distrital Francisco José de Caldas (nldiaza@udistrital.edu.co).

Andrés Jutinico Alarcón, Universidad Distrital Francisco José de Caldas (aljutinicoa@udistrital.edu.co).

Las imágenes de las microrredes fueron elaboradas con imágenes de Ambar disponible en https://www.freepik.es/icono/generacion-energia_6114462#fromView=resource_detail&position=2

I. INTRODUCCIÓN

UNA microrred, en su definición más aceptada, es un sistema energético definido, operado por un usuario, o un grupo de estos, en donde hay sistemas de generación, que suelen ser distribuidos e incluir diversas fuentes de generación, convencionales y alternativas. También cuentan con sistemas de almacenamiento, distribución y transmisión de energía. [1]

Para su operación se suelen tener diversos niveles de control, para garantizar la generación, el almacenamiento, la calidad del recurso. En su más bajo nivel, cada elemento dentro de la microrred tendrá un controlador [2] Un siguiente nivel se encarga de la gestión energética interna, es decir que actúa como un lazo superior de control en donde se dan órdenes a recursos energéticos distribuidos para cambiar puntos de operación, modos de control etc., e incluso permitir conectarse a la red principal o no [2].

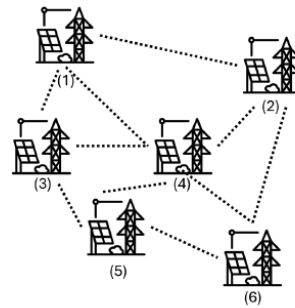


Fig. 1: Sistema de Microrredes Interconectadas

Un siguiente nivel de control busca hacer una gestión del recurso en sistemas de microrredes interconectadas entre sí para mejorar disponibilidad del recurso (figura 4. costos operativos, ampliar la cobertura y poder operar en condiciones adversas [3]. Otra aplicación con creciente uso es el de uso implementación en lugares donde los sistemas energéticos nacionales no pueden llegar por factores socio-económicos, geográficos o de otra índole que lo hace inviable [4].

El último nivel de control, el de gestión en sistemas de microrredes, presenta una serie de desafíos y oportunidades que lo hacen un caso de estudio muy activo y que permitiría solucionar problemas para hacer una implementación a mayor escala [2]. Para esto, se propone una estrategia de gestión

basada en dinámicas epidemiológicas, donde cada microrred actúa como un agente que a su vez tendrá una dinámica de estados según su dinámica interna de pérdida de carga y/o exceso de generación. Cada agente dentro del sistema interactúa con los demás agentes buscando enlaces de colaboración para mantener la confiabilidad del sistema, intercambiando energía según sus necesidades.

Esta dinámica se analiza desde la óptica de la epidemiología asemejando los estados de pérdida de carga y/o exceso de generación como un estado infeccioso y la colaboración en el intercambio de energía como los estados susceptibles, expuestos y retirados de los modelos usados allí. Para la descripción de la estrategia aquí planteada el documento se desarrolla en 3 partes: un breve desarrollo de los sistemas de gestión energética en sistemas de microrredes, una introducción a los modelos epidemiológicos, y finalmente, el desarrollo de la propuesta, que cuenta con un caso de ejemplo.

II. SISTEMAS DE GESTIÓN ENERGÉTICA

La gestión de energía en sistemas de microrredes interconectadas busca que haya una transferencia de potencia entre las microrredes de tal manera que se permita una operación a menor costo, con una alta disponibilidad y confiabilidad del recurso y que este esté dentro de los parámetros de calidad establecidos [3]

Bajo esta premisa, se han desarrollado diversas soluciones desde varias de perspectivas. La bibliografía reporta desde algoritmos basados en Inteligencia Artificial, hasta algunos que pudieran ser catalogados como clásicos como sistemas de eventos discretos. Inclusive varias estrategias encontradas combinan enfoques para potenciar los resultados.

Por ejemplo, la Inteligencia Artificial aplicada a Sistemas de Gestión Energética, se se puede aplicar desde técnicas de control para los niveles más bajos, hasta como sistemas de predicción para eventos climatológicos o de comportamiento de precios. [5] O como en [6] donde se usa una Red Neural Artificial para el control de dos compensadores, optimizada mediante un modelo de ecosistema artificial.

Los sistemas de eventos discretos, por su parte, son bastante aplicados a sistemas de control o para el modelamiento de sistemas complejos [7]. Desde el punto de vista de los sistemas de gestión energética, varias de las características son aplicables y aprovechadas para potenciarlos.

En el caso de [8], se construye un sistema de gestión el cual ajusta los modos de control, prioriza, conecta o desconecta las cargas conectadas al sistema regional basado en condiciones de demanda de potencia, generación, Estado de Carga de Baterías e incluso precios del mercado. Se busca que el sistema de gestión pueda optimizar el uso de recursos y posibilite el control en condiciones variantes con mejores

velocidades de respuesta.

III. Modelos Epidemiológicos

En epidemiología, los modelos se utilizan con varios propósitos, uno de ellos es el entendimiento de la enfermedad, como es la transmisión y que se puede esperar de esta si no se aplican medidas de control. De este se desprende la aplicación de proyección y estimación, que podrá suceder en distintos escenarios, con diversas medidas de control (aislamiento, vacunas, medicamentos, etc.) [9].

El modelo clásico, y aún muy utilizado, **SIR** fue el propuesto por Kermack y McKendrick en 1927 [10] este describe la dinámica de las etapas epidemiológicas por las que transita un individuo de cierta población. Comenzando por el estado **Susceptible**, en el cual el individuo puede ser infectado por otro y que lo lleva a la siguiente etapa, **Infectado**, durante la cual puede contagiar a otro individuo, y finalmente el individuo es **Retirado** de la población, ya sea porque ha fallecido o porque ha generado inmunidad para la enfermedad.

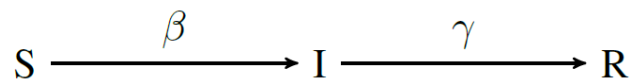


Fig. 2: Grafo modelo SIR

Desde el punto de vista determinista, el tránsito entre etapas o estados de la enfermedad del modelo **SIR** se da como se ve en la Figura 2, en donde cada paso está dado por una tasa constante determinada por la historia natural de la enfermedad o a base de observaciones en la población. (β tasa de **Susceptible** a **Infectado**, γ de **Infectado** a **Retirado**). De este se desprenden las ecuaciones diferenciales que gobiernan el modelo.

Otro enfoque utilizado para el modelamiento de sistemas epidemiológicos es el estocástico. En este caso, el tránsito entre etapas epidemiológicas de cada individuo está descrito por distribuciones de probabilidad, que junto a las tasas y umbrales generan la dinámica de la enfermedad. Este enfoque puede combinarse a los sistemas multiagentes en donde cada sujeto de la población a estudiar será un agente que actúa gobernado por las reglas de interacción que se definan y que como resultado se genere la transmisión de la enfermedad por los medios de transmisión de la misma (respiratorios, contacto, vectores, sexual, etc.).

Otro modelo más reciente y que resulta muy útil para la aplicación en sistemas de gestión energética es el propuesto en [11] **SEIR-V**. En este se adicionan dos estados al modelo de Kermack y McKendrick: **Expuesto** y **Vacunado**. Tal y como se ve en la Figura 3., en donde nuevamente se ven las tasas para el tránsito entre estados (β tasa de **Susceptible** a **Expuesto**, α de **Expuesto** a **Infectado**, γ de **Infectado** a

Retirado, ν de **Susceptible** a **Vacunado**) El estado **Expuesto** se refiere al estado en el que una persona susceptible ha tenido interacción con una persona infecciosa y se ha transmitido el virus, pero esta persona aún no es contagiosa, está en un estado de latencia. El estado **Vacunado**, por su parte, genera una inmunidad artificial que la retira de la población. Ahora bien, esta inmunidad puede ser limitada en el tiempo y no generar inmunidad total, sino hacer que se requiera mayor carga viral para lograr la transmisión, y con esto, limitar los síntomas en cantidad y severidad por actuación del sistema inmune.

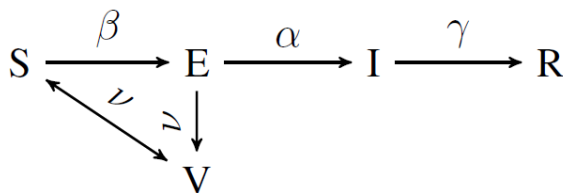


Fig. 3: Grafo modelo SEIR-V

IV. ESTRATEGIA PROPUESTA

Dada su naturaleza una microrred puede trabajar bajo distintas circunstancias. Si se describe como un sistema de eventos, se puede resumir en:

1. Funcionamiento normal, con posibilidad de generación adicional y con ESS dentro de parámetros de operación
2. Funcionamiento normal, con posibilidad generación adicional pero con ESS al máximo establecido
3. Funcionamiento normal, pero sin posibilidad de generación adicional y/o con ESS fuera de límites
4. Funcionamiento normal, pero con demanda que supera la generación
5. Funcionamiento aislado

Del mismo modo, existen 5 estados en el modelo *SEIR-V*:

1. **Susceptible**, que puede contraer la enfermedad
2. **Expuesta**, ha tenido contacto con persona infecciosa, pero no puede transmitir el virus
3. **Infectada**, que puede transmitir el virus. Puede ser sintomática o asintomática
4. **Retirada**, que ha ganado inmunidad a la enfermedad luego del contagio
5. **Vacunada**, que ha ganado inmunidad artificial. Puede ser temporal y de efecto limitado

Lo anterior permite construir una semejanza entre los estados de la microrred dentro del sistema y los estados epidemiológicos en el modelo *SEIR-V*. En este caso una microrred estará "**enferma**" cuando suceda una de dos condiciones: a) que tenga un exceso de generación y no haya

demanda interna y los ESS no puedan absorberla, o b) cuando haya una demanda muy alta y la generación interna junto con los ESS no estén en capacidad de atenderla. Cuando esta solicite a una microrred vecina apoyo para atender el evento infectará a esta segunda microrred.

Por el otro lado, una microrred que tenga capacidad de generación adicional y/o pueda recibir exceso de potencia de otra microrred estará en modo **susceptible**. Si esta microrred **susceptible** entra en interacción con una infectada, entrará a modo expuesto, en donde recibirá el exceso de generación de esta o realizará generación adicional para cubrir las demandas de la microrred **infectada**. Si esta interacción puede ser solventada la microrred en esta **expuesto** se mantendrá así hasta que la microrred **infectada** salga de su estado; en el caso contrario, la microrred que estaba en modo expuesta pasará a estar **infectada**, y ahora las dos infectadas buscarán infectar a nuevas microrredes de la vecindad.

Una microrred estará retirada de la interacción cuando por su propia dinámica interna no sea capaz de recibir o entregar desde o hacia una microrred infectada. El estado **Vacunada** se aplicará cuando por alguna razón arbitraria una microrred salga de la interacción entrando en modo aislado.

Este modelo contempla la conexión con la red principal quien actuará como un súper agente que puede recibir el exceso de potencia o suministrarla cuando sea necesario.

1. Ejemplo de un caso

Para observar mejor esto, la figura 4., muestra la dinámica de infección en un sistema de 6 microrredes. En la parte a) se ve a la microrred (4) que entra en modo **infeccioso** por su dinámica interna (sobre generación o sobre demanda). En la parte b) la microrred (4) solicita interacción con las microrredes (3) y (5) que son las microrredes más cercanas; para salir del estado **infeccioso**. En esta parte habría un intento de infección entre agentes, pero como la microrred (5) está en modo aislado (**vacunada**) no hay interacción y por tanto no hay transferencia de energía. Con la microrred (3) se logra la conexión y por tanto esta última entra en modo **expuesta**, donde hará el intercambio necesario para que la microrred (4) salga del estado **infeccioso**.

En el caso de no lograr recibir/entregar lo requerido por la microrred (4) la microrred (3) entrará en modo **infeccioso** y por tanto deberá "**infectar**" a las microrredes vecinas para buscar salir del estado (entrará en contacto con la microrred (1)); como se ve en la parte c) de la figura 4. Ahí mismo se ve como la microrred (4) al mantenerse en el estado **infectada** buscará otra microrred accesible para el intercambio y lograr así superar su estado. Finalmente, en la parte d) se ve que la microrred (3) logra salir del estado infectado y se pondrá en **retirado** puesto que no podrá intercambiar energía con otra microrred. La microrred (1) logra apoyar a la microrred (3) sin superar sus propias restricciones, por lo que al finalizar la

interacción volverá al estado **susceptible**. Por su parte las microrredes (4) y (6) seguirán en intercambio hasta que alguna condición las haga cambiar de estado (se superen las restricciones de (6), (4) logre el equilibrio de potencia interna, etc.).

El cambio entre estados de una microrred dependerá de las condiciones y configuraciones internas de cada una, es decir sus sistemas de generación, almacenamiento y cargas, con sus respectivos controladores de primer y segundo nivel.

La dinámica epidemiológica será constante, pudiendo llegar a un equilibrio endémico en el que se podrá mantener las infecciones en un número bajo por la propia dinámica de la enfermedad y de las interacciones en la población. Para el caso del sistema de microrredes, es esta la potencialidad de la estrategia buscando ese equilibrio en el que puedan ser atendidas las nuevas **infecciones** por las microrredes **susceptibles** logrando la confiabilidad y disponibilidad del recurso.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El modelo conceptual es aplicable a sistemas de multi-microrredes, los estados epidemiológicos coinciden para la interpretación del sistema que puede "enfermarse" cuando haya exceso o defecto de generación. Bajo esta óptica se puede tener un sistema cooperativo que permita atender las necesidades de todos los agentes en la red aumentando el aprovechamiento de la generación alcanzando los objetivos de disponibilidad y resiliencia en el sistema de microrredes.

Conceptualmente el sistema podría ser aplicable a cualquier topología de clústeres, sin embargo es necesario realizar simulaciones y ahondar en el desarrollo del modelo para encontrar si esta hipótesis es verdadera. Del mismo modo, hay que desarrollar los modelos y realizar las simulaciones con distintas configuraciones de microrredes y topologías para establecer si la estrategia es aplicable y viable.

VI. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parcialmente financiado por minciencias mediante el proyecto de investigación "Gestión de energía basada en computación en la nube para la interoperabilidad entre un grupo de microrredes aisladas" en el marco del Convenio Especial de Cooperación suscrito entre UNAL, UAN y UDFJC, bajo el marco del Contrato 807040 542 de 2020.

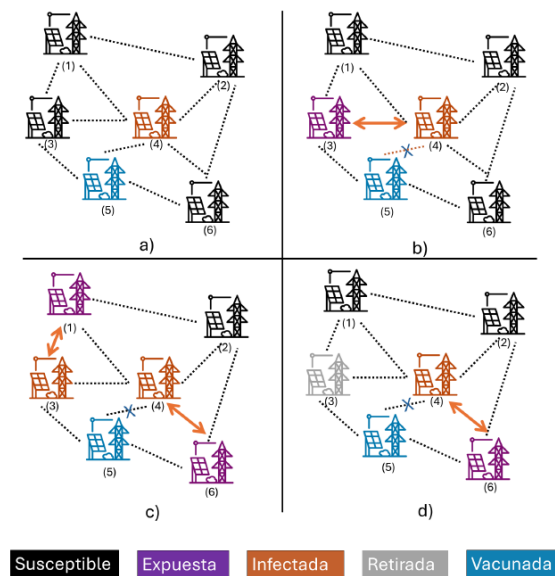


Fig. 4: Caso Dinámica de Infección Microrredes

REFERENCIAS

- [1] R. Lasseter, A. Akhil, C. Marnay, J. Stephens, J. Dagle, R. Guttromson, A. S. Meliopoulos, R. Yinger, and J. Eto, "Integration of distributed energy resources. the certs microgrid concept," 2002.
- [2] L. Meng, Q. Shafiee, G. F. Trecate, H. Karimi, D. Fulwani, X. Lu, and J. M. Guerrero, "Review on control of dc microgrids," *IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics*, vol. 5, n° 3, pp. 928-948, 2017.
- [3] M. Shafiullah, A. M. Refat, M. E. Haque, D. M. H. Chowdhury, M. S. Hossain, A. G. Alharbi, M. S. Alam, A. Ali, and S. Hossain, "Review of recent developments in microgrid energy management strategies" *Sustainability*, vol. 14, n° 22, p. 14794, 2022.
- [4] J. B. Ihler, L. O. Soares, Y. A. Alves, C. G. Souza, R. A. M. Boloy, et al., "Global trends and opportunities in hybrid microgrid systems using renewable energies" *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 12, n° 4, pp. 263-273, 2022.
- [5] N. Altin and S. E. Eyimaya, "Artificial intelligence applications or energy management in microgrid" *2023 11th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)*, IEEE, 2023, pp. 1-6, 2022.
- [6] R. Ratnakaran, G. B. Rajagopalan, and A. Fathima, "Artificial ecosystem optimized neural network controlled unified power quality conditioner for microgrid application," *Energy Informatics*, vol. 6, n° 12, 2023.
- [7] G. Ciardo and P. Darondeau, "Applications and Theory of Petri Nets 2005," *26th International Conference, ICATPN 2005*, vol. 3536, 2005.

- [8] G. Wang, X. Yang, W. Cai, and Y. Zhang «Event-triggered online energy flow control strategy for regional integrated energy system using lyapunov optimization,» *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 125, p. 106451, 2021.
- [9] O. A. Montesinos-López and C. M. Hernández-Suárez, «Modelos matemáticos para enfermedades infecciosas,» *salud pública de México*, vol. 49, n° 3, pp. 218-226, 2007.
- [10] W. O. Kermack and A. G. McKendrick, «A contribution to the mathematical theory of epidemics,» *Proceedings of the Royal Society of London A: mathematical, physical and engineering sciences*, vol. 115, n° 772, pp. 700-721, 1927.
- [11] T. Phan, «“A simple seir-v model to estimate covid-19 prevalence and predict sars-cov-2 transmission using wastewaterbasedsurveillance data,» *Science of The Total Environment*, vol. 857, p. 159326, 2023.

An Iterative Methodology for Evaluating Large Language Models in IoT Weather Monitoring Systems

Bello G. Ivan D., Gaona G. Elvis E., Gaona G. Paulo A.,

Abstract—This paper presents a novel methodology for evaluating and selecting Large Language Models (LLMs) in Internet of Things (IoT) applications, focusing on weather monitoring systems. The proposed approach addresses challenges in performance optimization, cost management, and adaptation to resource-constrained environments. A five-stage iterative process is introduced, encompassing system identification, development, testing and monitoring, evaluation, and analysis. The methodology incorporates both automatic metrics and human evaluation techniques to provide a comprehensive assessment of LLM performance. A key feature is implementing a ReAct (Reasoning and Acting) agent, enhancing the LLM's decision-making capabilities within the IoT environment. The paper demonstrates the methodology's application through a weather monitoring IoT system case study, evaluating four state-of-the-art LLMs: Claude-3-5-Sonnet, GPT- 4o, LLaMA-v3-70B-Instruct, and Yi-Large. Results highlight trade-offs between performance, cost, and efficiency, providing insights for optimal LLM selection in IoT contexts. This research contributes to the growing field of AI-enhanced IoT systems, offering a structured approach for integrating advanced language models with sensor-based technologies.

Index Terms— Artificial Intelligence, Internet of Things, Large Language Models, Performance Evaluation, ReAct Agent, Weather Monitoring Systems.

I. INTRODUCTION

The integration of Large Language Models (LLMs) with Internet of Things (IoT) systems represents a significant advancement in smart technologies, particularly in complex applications such as weather monitoring systems. This fusion promises to enhance IoT devices' interpretation, analysis, and user interaction capabilities. However, selecting and implementing appropriate LLMs for IoT applications present unique challenges, including performance optimization, cost management, and adaptation to resource-constrained environments.

Recent advancements in LLMs, IoT, and cloud computing have opened new possibilities for improving the accuracy and efficiency of weather predictions [1], [2]. LLMs, such as GPT and Claude, have demonstrated capabilities in natural language understanding and time series prediction tasks, which are

crucial for weather forecasting [3], [4]. IoT systems enable real-time collection of meteorological data through sensors, while cloud computing provides the necessary infrastructure for scalable data storage and analysis [5], [6].

This paper proposes a comprehensive methodology for evaluating and selecting LLMs for IoT applications, specifically focusing on a weather monitoring system. The methodology addresses critical aspects of LLM integration, including system identification, performance metrics, testing procedures, and analysis techniques. A key component of this study is the implementation of a ReAct (Reasoning and Acting) agent, which enhances the LLM's decision-making capabilities within the IoT environment [7].

The research addresses challenges such as identifying appropriate evaluation metrics, developing a scalable cloud platform for IoT data processing, and defining a methodology encompassing various analysis phases for LLM selection [8]. This study seeks to facilitate more effective and efficient deployments of AI-enhanced IoT systems for weather prediction applications by providing a structured approach to LLM evaluation in IoT contexts.

The remainder of this paper is structured as follows: section II Methodology outlines the proposed five-stage iterative methodology for evaluating LLMs in IoT applications. Section III Case Study presents a detailed application of the methodology to a weather monitoring IoT system, including implementation details and results. Section IV Conclusion summarizes key findings and discusses implications for the field.

II. METHODOLOGY

The proposed methodology for evaluating LLMs in IoT applications comprises five iterative stages: Identify, Develop, Test and Monitor, Evaluate, and Analyze. The IoT system components and architecture are outlined in the Identify stage, relevant performance metrics are selected, and necessary tests are designed. This stage also involves establishing a comprehensive evaluation plan and considering various LLM models. The development stage focuses on modifying the LLM or IoT system to facilitate monitoring and data collection,

This paper was submitted for review on [27 July 2024]. This work was supported in part by the research groups JIIRA and GITUD at the Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (Corresponding author: Iván Dario Bello González.)

Bello G. Ivan D is with the Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones- Faculty of Engineering, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia (e-mail: idbellog@udistrital.edu.co).

Gaona G. Elvis E is with the Maestría en Ciencias de la Información - Faculty of Engineering, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia (e-mail: egaona@udistrital.edu.co).

P. A. Gaona García is with the Maestría en Ciencias de la Información - Faculty of Engineering, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia (e-mail: pagaonag@udistrital.edu.co).

including configuring monitoring tools, integrating logging mechanisms, and implementing additional configurations to ensure efficient operation within IoT device constraints.

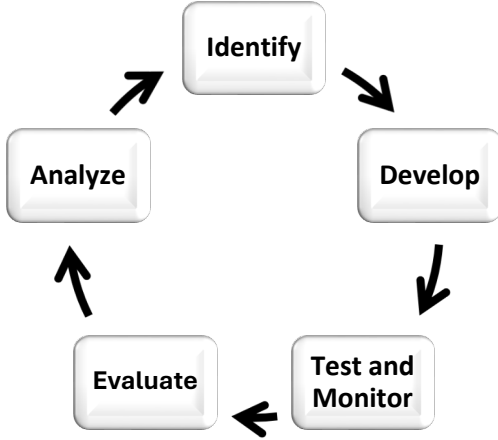


Fig. 1. Methodology Diagram

The Test and Monitor stage involves executing prepared tests in simulated and real-world environments, comparing various LLMs, and conducting continuous data collection using configured monitoring tools. The evaluation stage introduces a comprehensive assessment using both automatic techniques (classification accuracy and F1 score) and human evaluation 2) methods (including binary ratings and a 5-point scale assessment). Finally, the Analyze stage examines collected data to identify trends, anomalies, and areas for improvement, a) conducts statistical and qualitative analyses, and recommends optimization actions. This iterative process allows continuous refinement and adaptation to evolving IoT requirements, aiming to select the best LLM for the specific IoT application.

III. CASE STUDY: WEATHER MONITORING IoT SYSTEM

This application demonstrates the practical implementation of the approach in a real-world scenario, highlighting the integration of LLMs with IoT sensors for environmental data analysis.

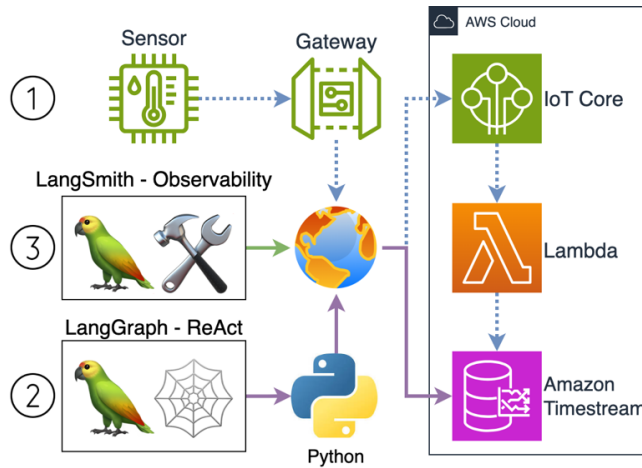


Fig. 2. Operational flow of the System

A. Identify

1) System Identification

The proposed system requires the use of a LLM to obtain sensor information in a natural manner. This model should be capable of deducing and drawing conclusions from various climate metrics. The system incorporates the following weather variables, which are processed using Lambda functions and stored in the Amazon Timestream database, table 1:

TABLE I

WEATHER AND COMMUNICATION VARIABLES IN THE SYSTEM

Weather Variables	Communication Variables
1) Temperature	11) RSSI (Received Signal Strength Indicator)
2) Light intensity	12) SNR (Signal-to-Noise Ratio)
3) Cloud base altitude	13) Frequency
4) Dew point	14) Frame Count
5) Actual vapor pressure	
6) Heat index	
7) Saturation vapor pressure	
8) Pressure	
9) Humidity	
10) Relative humidity	

2) Component Identification

The IoT architecture comprises several key components:

- Sensor Module:** LoRaWan® 1.0.2 protocol RAK19007 / RAK4631. This module is programmed to transmit both sensor values and communication-related information. It includes a) Temperature & humidity sensor (RAK1901) b) Barometric pressure sensor (RAK1902). c) Light sensor (RAK1903)
- Gateway:** 8 Channel Indoor LoRaWan (RAK7268), The gateway is configured and registered using security credentials in AWS.
- AWS IoT Core:** Responsible for receiving information from the sensor and activating a rule to trigger a Lambda function.
- AWS Lambda Function:** Tasked with receiving, decoding, and processing the information before storing it in the Amazon Timestream database.
- Amazon Timestream:** This time-series database stores the processed sensor data.
- LangGraph with ReAct Agent:** A Python-based implementation using the LangGraph library. It configures a ReAct agent with tools to retrieve information from the Amazon Timestream database. This component manages communication with and utilization of various LLM models.
- LangSmith:** An observability framework employed to evaluate the performance of different LLM models. It assesses metrics such as latency, stream analysis, and token usage.

This architecture enables a comprehensive flow of data from the IoT sensors through cloud processing and storage, culminating in advanced analysis using LLMs. The inclusion of LangSmith provides valuable insights into the performance characteristics of the deployed models.

3) Models for Evaluation

The selection of models for evaluation is based on the latest versions available at the time of testing, as listed on the artificial analysis platform <https://artificialanalysis.ai/>. The following models were chosen for their advanced capabilities and potential applicability to the IoT weather monitoring system:

- Anthropic's Claude-3-5-Sonnet-20240620: Claude 3.5 Sonnet represents Anthropic's most advanced AI model. It excels in natural language understanding, reasoning, and coding tasks. This model offers significant improvements in speed and cost-efficiency compared to its predecessors, making it suitable for complex applications such as customer support and workflow automation.
- OpenAI's ChatGPT GPT-4o: GPT-4o is the latest iteration in OpenAI's GPT-4 series. Known for its advanced natural language processing capabilities, this model focuses on enhancing language comprehension, generation, and contextual understanding. These features make it highly effective for a variety of conversational and analytical tasks.
- Meta AI's LLaMA-v3-70B-Instruct: LLaMA v3-70B is part of Meta AI's LLaMA series, designed for large-scale language model applications. It is optimized for instruction-following tasks, providing detailed and accurate responses. This model is highly relevant for applications requiring substantial language understanding and generation capabilities.
- 01.AI's Yi-Large: Yi-Large, developed by 01.AI, focuses on providing robust performance in natural language understanding and generation. It is designed to handle a wide range of tasks, from simple queries to more complex interactions, ensuring versatility and efficiency in various applications.

4) Evaluation Questions

To assess the performance of the selected LLM models in the context of the IoT weather monitoring system, a set of questions was developed. These questions are designed to evaluate the response quality and reasoning capabilities of the ReAct agent using different LLMs across various complexity levels. The questions cover different aspects of IoT applications and are structured as follows, table II:

5) Model Selection Criteria

The selection of the optimal LLM for the IoT weather monitoring system is based on a comprehensive set of criteria. These criteria are designed to evaluate the models' performance, efficiency, and suitability for IoT applications. The ReAct agent's decision-making process regarding tool utilization is also considered. The evaluation criteria are as follows:

- Cost:** The evaluation considers the computational and operational costs associated with each LLM. This factor is crucial for budget management, especially in large-scale IoT deployments where high costs can limit scalability and feasibility.
- Latency:** latency refers to the time elapsed between submitting a query and receiving the model's response. Low latency is crucial for maintaining a seamless user experience and ensuring the efficiency of applications that rely on real-time or near-real-time interactions.

- Answer Quality:** The accuracy and relevance of the LLM's outputs are evaluated to ensure high-quality answers. This criterion is vital for the effectiveness of the IoT application, as poor answer quality can lead to incorrect actions or misinterpretations, impacting overall system reliability.
- Reasoning Quality:** The LLM's ability to perform logical reasoning and provide coherent responses is assessed. Superior reasoning quality enhances the system's capability to handle diverse and unforeseen scenarios, which is essential for complex decision-making processes within IoT systems.
- Token Usage:** Efficient token usage is evaluated to ensure that the LLM processes data within acceptable resource limits. This criterion helps maintain performance without overloading the system, as excessive token usage can lead to increased costs and slower processing times.
- Number of Tools Utilized:** The quantity of tools or external resources utilized by the LLM, as decided by the ReAct agent, is considered. While a higher number of tools might improve functionality, it can also increase complexity and resource requirements.

TABLE II
QUESTIONS TO EVALUATE LLM PERFORMANCE
Q# QUESTION LEVEL COMPLEXITY FOR THE LLM

Q1	What is the temperature?	This serves as a baseline. Any competent LLM agent should handle this simple data retrieval task easily
Q2	What is the current light intensity?	Similar to the first, but tests if the agent can distinguish between different types of sensor data
Q3	How strong is the sensor's signal, considering both RSSI and SNR?	This requires the agent to understand and combine multiple communication parameters, testing its ability to interpret related technical data.
Q4	Is there a risk of fog formation based on the dew point and temperature?	This tests the agent's ability to apply domain knowledge (meteorology) and make inferences from multiple data points.
Q5	What is the health of the IoT sensor?	This is the most complex, requiring the agent to consider all available data, potentially infer missing information, and make a holistic assessment. It tests the agent's analytical and reasoning capabilities

B. Develop

In this stage, the selection of tools for monitoring and applying the methodology is of paramount importance. For the case study at hand, LangSmith was chosen as the primary tool to obtain information for evaluating the different LLM models. To proceed with the monitoring, several key steps were taken. First, the necessary libraries for LangSmith integration were imported into the project environment. This step ensures that all required dependencies are available for seamless interaction

with the LangSmith platform. Following the library import, the LangSmith API key was configured to establish a secure connection between the project and the LangSmith platform. This configuration allows for authenticated access to LangSmith's features and ensures that data can be securely transmitted and received.

C. Test and Monitor

The testing and monitoring phase was conducted using a systematic approach to evaluate the performance of the selected LLM models in the context of the IoT weather monitoring system. Tests were executed using PyCharm as the development environment on a computer with a stable Ethernet internet connection. Model access varied, with standard API access utilized for Claude-3-5-Sonnet and GPT-4o, while the Fireworks.ai provider facilitated access to the LLaMA-v3-70B-Instruct and Yi-Large models.

The testing process followed a sequential model-by-model approach. Five predefined questions were posed to each model in succession, and this process was repeated for all four LLM models under evaluation. This methodical approach ensured consistency in the testing conditions across all models, allowing for a fair comparison of their performance.

D. Evaluate

The evaluation phase focuses on selecting the optimal LLM model for extracting information from the sensor and its communication system. The assessment criteria include answer quality, reasoning quality, cost, and latency. Answer quality and reasoning quality are assessed through human evaluation, while cost, tokens and latency data are derived from LangSmith monitoring.

Human evaluation methods incorporate both binary and scalar assessments. The binary assessment involves a simple "thumbs up" if the response is satisfactory. The scalar assessment uses a rating scale of 1 to 5, evaluating creativity and relevance of the responses.

The final scores for reasoning quality and answer quality are calculated using a weighted combination of binary and scalar assessments. For the scalar score, the average of all evaluators' 1-5 ratings is computed. The binary score is determined by the majority response (thumbs up or down). The combined score (S) is calculated using the formula:

$$S = (0.3 * B) + (0.7 * D)$$

Where B represents the binary feedback (1 for "thumbs up", 0 for "thumbs down") and D is the average of the detailed 1-5 ratings.

This scoring arbitrary methodology gives a 30% weight to the binary assessment and a 70% weight to the detailed scalar assessment, providing a comprehensive evaluation that balances quick overall impressions with more nuanced ratings.

For benchmarking purposes, the best response among all models for each question was selected as the "golden test" answer. This approach allows for relative comparison of model performances across different questions and complexity levels.

E. Analyze

The analysis of model performances across different question complexities (Q1 to Q5) revealed several key insights:

For low-complexity questions (Q1 and Q2), all models demonstrated good reasoning quality. However, the LLaMA model received lower human evaluation scores for answer quality in Q1, often providing only numerical values without additional context. Despite this, LLaMA was noted to be one of the most cost-effective models at the time of the study. Performance improved across all models for Q2, suggesting better handling of light intensity data.

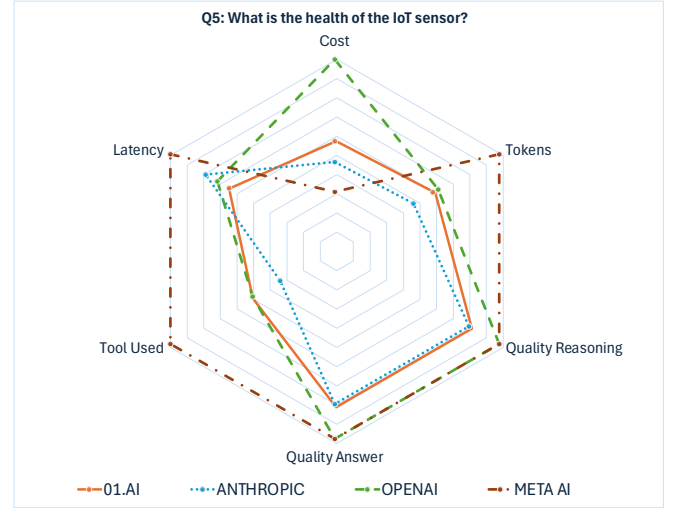


Fig. 3. Q5 -What is the health of the IoT sensor?, results.

In medium to high complexity questions (Q3 and Q4), the LLaMA-based agent used significantly more tokens and tools than other models. Investigation of LangSmith traces revealed that LLaMA encountered difficulties in correctly invoking tools for Q3, leading to increased token usage. Despite higher token usage, LLaMA remained one of the most cost-effective options in the market.

For the highest complexity question (Q5) (Fig. 3), all models generally performed well in terms of answer quality. However, GPT-4o exhibited notably higher costs compared to other models.

Overall performance analysis, represented in a radar chart (Fig. 4), highlighted several key observations:

- GPT-4o from OpenAI emerged as one of the most expensive models among those evaluated.
- LLaMA demonstrated cost-effectiveness but showed inconsistencies in answer quality and tool invocation.
- Claude-3-5-Sonnet and Yi-Large showed balanced performance across various metrics.

These results underscore the trade-offs between cost, performance, and reliability among the evaluated models. While GPT-4o showed high-quality outputs, its cost may be prohibitive for large-scale IoT applications. Conversely, LLaMA offers a cost-effective solution but may require additional development to improve its consistency and function-calling capabilities.

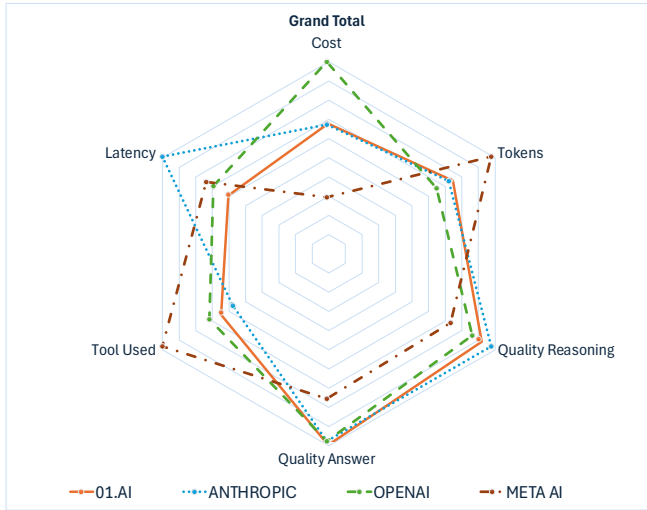


Fig. 4. Overall performance analysis.

The findings suggest that the choice of LLM for IoT applications should consider not only performance metrics but also the specific requirements and constraints of the deployment environment, including budget limitations and the need for consistent, reliable outputs. This comprehensive analysis provides valuable insights for selecting the most appropriate LLM model for IoT sensor data interpretation tasks, balancing performance, cost-effectiveness, and reliability.

IV. CONCLUSION

This study evaluated the performance of various Large Language Models in IoT applications, specifically for a weather monitoring system. The results indicate that all evaluated models demonstrated satisfactory performance in IoT applications, suggesting their viability for such use cases. The methodology aimed to identify LLMs that maintain consistency and high quality over time, crucial factors for long-term IoT deployments. The study also highlighted the importance of cost-efficiency, particularly for IoT applications that may require frequent LLM queries.

The cyclical nature of the evaluation process allows for continuous refinement and adaptation to evolving IoT requirements. The ReAct agent demonstrated excellent capability in tool selection for answering queries, enhancing the overall system effectiveness. Variations in model accuracy were observed across different question complexities, with some models (e.g., LLaMA) showing reduced accuracy for more complex queries. Notably, none of the evaluated models exhibited hallucination, consistently selecting tool-provided values for responses. Higher token or tool usage did not necessarily correlate with better performance in IoT applications, suggesting efficiency in resource utilization is key.

To mitigate potential bias, it is recommended that human evaluators remain unaware of the model origins during the assessment process. The majority of responses used as golden tests were derived from Anthropic's model, indicating its strong performance. This work paves the way for more human-like interactions with IoT applications, enabling natural language-

based querying and result interpretation.

Future studies should focus on evaluating more cost-effective models from each company and exploring the long-term consistency of LLMs in IoT environments. Additional research is needed to assess the scalability of these solutions in large-scale IoT deployments, considering both performance and cost factors. Investigating the potential benefits of fine-tuning LLMs for specific IoT domains could yield improved performance and efficiency.

In conclusion, this study demonstrates the potential of LLMs in enhancing IoT applications, particularly in data interpretation and user interaction. While challenges remain, particularly in balancing performance with cost-efficiency, the results indicate a promising direction for integrating advanced AI capabilities into IoT systems. The development of this work lays the groundwork for a more intuitive interaction with IoT applications, where conclusions can be drawn and results obtained through the use of natural language. This advancement signifies a significant step towards making IoT systems more accessible and user-friendly, potentially broadening their applicability across various domains.

REFERENCES

- [1] H. Zhou et al., "Informer: Beyond Efficient Transformer for Long Sequence Time-Series Forecasting," 2021.
- [2] K. R. Sri Preethaa, A. Muthuramalingam, Y. Natarajan, G. Wadhwa, and A. A. Y. Ali, "A Comprehensive Review on Machine Learning Techniques for Forecasting Wind Flow Pattern," Sep. 01, 2023, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/su151712914.
- [3] T. B. Brown et al., "Language Models are Few-Shot Learners," May 2020.
- [4] X. Dai, G. P. Liu, W. Hu, Z. Lei, and H. Zhou, "Learning from ChatGPT: A Transformer-Based Model for Wind Power Forecasting," in Proceedings - 2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2023, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/IEEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194807.
- [5] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, "Internet of things for smart cities," IEEE Internet Things J, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, Feb. 2014, doi: 10.1109/JIOT.2014.2306328.
- [6] N. Petrovic, S. Konicanin, and S. Suljovic, "ChatGPT in IoT Systems: Arduino Case Studies," in 2023 IEEE 33rd International Conference on Microelectronics, MIEL 2023, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/MIEL58498.2023.10315791.
- [7] S. Yao et al., "ReAct: Synergizing Reasoning and Acting in Language Models," Oct. 2022.
- [8] Y. Y. Lee, W. M. Kim, S. J. Sohn, B. R. Kim, and S. K. Seuseu, "Advances and challenges of operational seasonal prediction in Pacific Island Countries," Sci Rep, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-15345-w.

Introduciendo la circularidad en cadenas de suministro de IPS colombianas: Una priorización de prácticas de gestión utilizando DEMATEL

Juan C. Vargas-Muñoz, *Investigador grupo SEPRO, Universidad Nacional de Colombia, jucvargasmu@unal.edu.co*, Carlos E. Moreno-Mantilla, *Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial, Universidad Nacional de Colombia, cemorenoma@unal.edu.co*, Félix A. Cortes-Aldana, *Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial, Universidad Nacional de Colombia, facortesa@unal.edu.co*

Abstract—La administración de la cadena de suministro circular (CSCM, por sus siglas en inglés) nace de la integración de la Economía Circular y su filosofía a lo largo de la cadena, progresando hacia sistemas industriales restaurativos y regenerativos. Desde la literatura se han estudiado las prácticas y sub-prácticas CSCM aplicadas a diversos sectores industriales, no obstante, su participación es reducida para prestación de servicios y menos aún para servicios de salud. El sector salud colombiano presenta fuertes desafíos para implementar estas prácticas a lo largo de su cadena de suministro y en la prestación del servicio. Este estudio busca desarrollar un marco de priorización de prácticas CSCM para apoyar la toma de decisiones orientadas a la sostenibilidad de las IPS colombianas. Para ello, se utiliza el método Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL), el cual permite determinar las relaciones de causa y efecto entre las prácticas y sub-prácticas, y a su vez, jerarquizar las más importantes en términos de influencia. Tras una rigurosa depuración y selección, se evalúa un total de 6 prácticas y 25 sub-prácticas CSCM aplicables al sector salud en un contexto colombiano. Los resultados sugieren que en el sector salud las Prácticas de Iniciativa Administrativa (PIA) son las más influyentes en el sistema y las Prácticas de Producción más Limpia (PPL) son las más importantes. Las PIA, como sugiere la literatura, son determinantes en la toma de decisiones para la transición hacia la economía circular en estos sistemas productivos. Este estudio subraya que la implementación de este marco no solo ayuda a las IPS a cumplir con sus objetivos de sostenibilidad, sino que también se sitúa como una herramienta estratégica para guiar a los tomadores de decisiones en la adopción de prácticas de gestión de la cadena de suministro circular, promoviendo la transición hacia un modelo más sostenible en el sistema de salud colombiano.

Keywords— *Economía Circular, Prestación de servicios de salud, Multi-Criteria Decision Making, Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL), Circularidad en prestación de servicios, Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud (IPS)*

I. INTRODUCCIÓN

LA administración de la cadena de suministro circular (CSCM, por sus siglas en inglés) nace de la integración de la Economía Circular (CE) y la gestión de cadenas de suministro, orientándose hacia el diseño y administración de sistemas industriales restaurativos y regenerativos,

proponiendo ciclos de materiales técnicos (diseñados para su recolección, reparación, remanufactura, y reciclaje) y ciclos de materiales biológicos (recolectados para volver a ser parte de la biosfera como capital natural y reutilizados como insumos para la producción) (Farooque et al., 2019). Desde la literatura se han estudiado las prácticas y sub-prácticas CSCM aplicadas a diversos sectores industriales, las cuales son acciones que ayudan a reducir el impacto negativo ambiental en los procesos misionales de las organizaciones, a la vez que potencian el desempeño social y económico, hacia una visión de cero desperdicio [1]–[3]. No obstante, las investigaciones son reducidas para prestación de servicios y más aún para servicios de salud.

En Colombia, una Institución Prestadora de Servicios de Salud (IPS) se puede definir como una entidad, organización o establecimiento que ofrece servicios de atención médica y de salud a la población [4]. Estos servicios pueden incluir consultas médicas, procedimientos diagnósticos, tratamientos médicos, servicios de rehabilitación, procedimientos hospitalarios y clínicos, de cuidados intensivos, y otros relacionados con el cuidado de la salud [5]. En los últimos años, se ha prestado poca atención en proveer a los tomadores de decisiones con marcos de referencia desde donde puedan priorizar estratégicamente las iniciativas verdes y circulares en sus cadenas de suministro [6], [7]. Esto es de suma importancia para gestionar adecuadamente los recursos de una organización [8], más aún en el sector salud de países en desarrollo, donde no abundan los recursos y las iniciativas de prestación de servicios sostenibles son escasas.

Dando respuesta a este llamado de la literatura académica y a una necesidad social apremiante, el presente estudio desarrolla y valida un marco de priorización de prácticas de CSCM para apoyar la toma de decisiones orientadas a la sostenibilidad de las IPS colombianas. Se espera con esta contribución facilitar y fomentar la implementación de la filosofía circular en la industria de salud al ofrecer a los tomadores de decisiones herramientas que faciliten la identificación, selección e implementación de prácticas de CSCM.

II. METODOLOGÍA

Tras una rigurosa búsqueda de literatura y antecedentes en este campo, el método de toma de decisiones multicriterio (MCDM) seleccionado para este estudio es el Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL); este método resulta ser adecuado para priorizar las prácticas CSCM y elaborar un marco de priorización, pues revela las interacciones causales entre las prácticas, clasificándolas en grupos de causa y efecto [9]–[11]. Así, conociendo el comportamiento de la cadena de suministro en las IPS y tras determinar el listado de prácticas CSCM aplicables a las IPS en un contexto colombiano, se diseña una encuesta orientada a expertos del sector salud y expertos académicos en el campo de la gestión de la cadena de suministro, que permita obtener información cuantitativa de las interrelaciones entre las prácticas y sus pesos ponderados. Tras la aplicación de la encuesta, se recopilan y se procesan los datos recolectados, para finalmente elaborar la matriz de causa y efecto, y se organizan las prácticas en orden de influencia, lo cual será la base para elaborar el marco de priorización de prácticas de gestión de la cadena de suministro circular. Luego de realizar una búsqueda, depuración y selección, se evalúan 6 prácticas y 25 sub-prácticas de CSCM aplicables al sector salud en un contexto colombiano, las cuales fueron adaptadas principalmente de los hallazgos de [12] en el campo de CSCM y los aportes de [13] de circularidad en el sector salud.

III. RESULTADOS

El instrumento fue diligenciado por 10 expertos en el área de logística hospitalaria o gestión de la cadena de suministro en el sector salud, pertenecientes a la industria o a la academia. Tras procesar las respuestas de los expertos mediante el método DEMATEL, se obtuvieron los siguientes resultados:

TABLA I

PROMINENCIA Y RELACIÓN PARA CADA PRÁCTICA CSCM

Prácticas CSCM	D	R	D+R	D-R
Prácticas de iniciativa administrativa (PIA)	5.7955	4.5789	10.3745	1.2166
Prácticas basadas en la economía (PBE)	4.5065	4.9635	9.4700	-0.4569
Prácticas de producción más limpia (PPL)	5.2941	5.1373	10.4314	0.1568
Prácticas de diseño circular (PDC)	4.1869	5.0626	9.2496	-0.8756
Prácticas tecnológicas y de infraestructura (PTI)	5.0207	5.0528	10.0736	-0.0321
Prácticas sociales y culturales (PSC)	4.8291	4.8378	9.6670	-0.0087

Por medio de la Tabla 1 es posible identificar las prácticas más prominentes en términos de influencia (columna D+R) y la relación de esa influencia, es decir el grupo al cual pertenece (columna D-R, valores positivos para el grupo causa y negativos para el grupo efecto).

Los resultados sugieren que en el sector salud colombiano las PIA y PPL son las prácticas con mayor influencia (grupo causa) y a la vez son las más prominentes. Por el contrario, las

PTI, PSC, PBE, y PDC pertenecen al grupo efecto, es decir, las prácticas influenciadas. En otras palabras, estas últimas se ven fuerte y moderadamente influenciadas por las PIA y las PPL. Particularmente las PDC y PBE son las prácticas que, en el sector salud y contexto socioeconómico colombiano, son las menos importantes según las opiniones de los expertos evaluadores, y a su vez las más influenciadas.

Al evaluar las sub-prácticas del grupo de PIA, se obtuvieron los siguientes resultados:

TABLA II

PROMINENCIA Y RELACIÓN PARA CADA SUB-PRÁCTICA PIA

Sub-Práctica i	D	R	D+R	D-R
(2.1) Fomentar el apoyo y compromiso de los directivos respecto a las perspectivas de la EC en la cadena de suministro	6.3212	5.0717	11.3929	1.2496
(2.2) Adoptar una mentalidad de ciclo cerrado que busca maximizar la eficiencia y minimizar el desperdicio en todas las etapas de la cadena de valor	5.6523	5.6780	11.3302	-0.0257
(2.3) Educar y formar al personal asistencial en la gestión del ciclo de vida de los productos y servicios	4.7927	5.7997	10.5925	-1.0070
(2.4) Ejecutar programas de formación y concienciación para los actores de la cadena de suministro sobre las prácticas de EC	5.3197	5.6330	10.9527	-0.3134
(2.5) Comunicar las oportunidades de negocio originadas en la EC a los actores de la cadena de suministro	5.5417	5.4452	10.9869	0.0965

La sub-práctica con mayor prominencia u orden de prioridad es la 2.1 seguido de la 2.2, no obstante, únicamente las sub-prácticas 2.1 y 2.5 pertenecen al grupo causa, el resto pertenecen al grupo efecto.

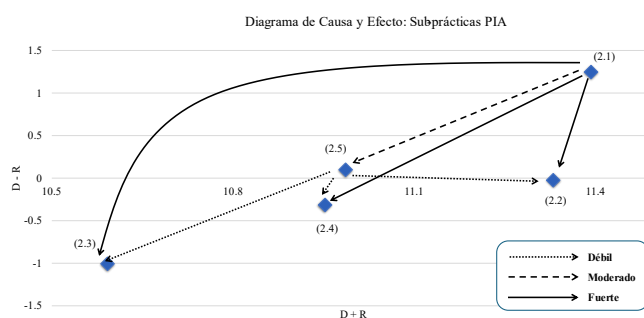


Fig. 1. Diagrama de causa y efecto, Sub-prácticas PIA

La Figura 1 presenta el diagrama de causa y efecto para las sub-prácticas PIA, trazando con flechas unidireccionales el nivel de influencia de unas hacia otras.

La sub-práctica 2.1 se muestra como una causa fuerte en el sistema, esto sugiere que el apoyo y el compromiso de los directivos son fundamentales para influir en otras prácticas dentro de la IPS. Además, cuando se fomenta el apoyo y el compromiso de los directivos, se espera que otras sub-prácticas se vean afectadas positivamente. Similarmente, la sub-práctica de adoptar una mentalidad de ciclo cerrado es una consecuencia importante de otras prácticas, que pese a no

pertenecer al grupo causa, sugiere que es un resultado importante que influye significativamente en otras sub-prácticas.

La sub-práctica 2.3 tiene una prominencia débil en este grupo, además de ser la sub-práctica más influenciada. Esto sugiere que educar y formar al personal asistencial en la gestión del ciclo de vida de los productos y servicios no es un factor crítico en el sistema, pero sí se ve influenciado por otras sub-prácticas.

Por otra parte, comunicar las oportunidades de negocio originadas en la EC a los actores de la cadena de suministro (2.5) tiene una influencia débil sobre todo el grupo efecto. En contraste, adoptar una mentalidad de ciclo cerrado que busca maximizar la eficiencia y minimizar el desperdicio en todas las etapas de la cadena de valor (2.2) tiene una alta prominencia en el sistema pese a pertenecer al grupo efecto, por lo tanto, es de considerar que las influencias sobre esta sub-práctica son decisivas e importantes para su implementación.

De la misma manera, se procesan las opiniones de los expertos por cada una de las sub-prácticas agrupadas por cada práctica y con estos resultados se desarrolla el marco de priorización de prácticas CSCM aplicables al sector salud colombiano.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación revelan que las Prácticas de Iniciativa Administrativa (PIA) y las Prácticas de Producción más Limpia (PPL) son las más influyentes y prioritarias en el contexto de las Instituciones Prestadoras de Servicios de salud (IPS) colombianas. Estos hallazgos coinciden parcialmente con los resultados obtenidos por [12] y [10], quienes destacan que las prácticas de gestión y económicas, junto con las iniciativas gubernamentales, son cruciales para la adopción efectiva de la circularidad en cadenas de suministro. La diferencia radica en que en nuestro estudio no se incluyen explícitamente las iniciativas gubernamentales, pues se decidió eliminar esta dimensión de la investigación, lo que podría sugerir una particularidad del sector salud colombiano, donde el liderazgo y las prácticas internas de la organización juegan un rol más predominante.

En el estudio realizado por [13] identifican que la visión y el aprendizaje en circularidad, las políticas de logística inversa y la colaboración tecnológica son factores causales clave en CSCM. Este estudio complementa nuestros hallazgos al destacar la importancia de la visión compartida y el aprendizaje, que se alinean con la sub-prácticas de las PIA, mayormente con la sub-práctica 2.1, de fomento del apoyo y compromiso de los directivos, y de la 2.4, de ejecución de programas de formación y concientización de los actores de la cadena de suministro sobre las prácticas de EC. Sin embargo, el marco prioriza las PIA y PPL por encima de las Prácticas Tecnológicas y de Infraestructura (PTI), posiblemente debido a las limitaciones financieras y de infraestructura mencionadas por los expertos en el contexto colombiano.

En [14] resaltan la necesidad de asociaciones estratégicas y la implementación de sistemas de información verdes para integrar la filosofía circular en la gestión de la cadena de

suministro. No obstante, mientras que nuestro estudio también reconoce la importancia de las colaboraciones entre *stakeholders* y la adopción de nuevas tecnologías, estas no emergen como factores predominantes, lo cual podría explicarse por el bajo nivel de madurez tecnológica y la resistencia al cambio observada en las IPS colombianas [15]. Siguiendo esta línea, nuestro estudio resalta barreras como la resistencia al cambio y la falta de compromiso profundo más allá del cumplimiento normativo mínimo. En [16] enfatizan la necesidad de cambios políticos y educativos en China para fomentar la circularidad en la cadena de suministro agroalimentario. Estos resultados sugieren que las barreras normativas y la falta de educación son desafíos universales que también afectan al sector salud colombiano.

V. CONCLUSIONES

En esta investigación, todas las sub-prácticas más prominentes coincidieron con el grupo causa, pero esto no necesariamente debe ser así. Asimismo, las sub-prácticas menos prominentes no necesariamente pertenecen al grupo efecto. Esto, para resaltar que aquellas que pertenecen al grupo efecto no siempre son las menos importantes y, pese a no tener una fuerte influencia sobre las otras, sí pueden tener una gran prominencia en el sistema, en otras palabras, la implementación de esta sub-práctica podría traer un fuerte beneficio al sistema aun cuando su implementación se vea influenciada por el grupo causa.

Contrario a la tendencia en la literatura, donde el diseño circular es fundamental para promover iniciativas de reverdecimiento en cadenas de suministro de industrias manufactureras, este no parece ser el caso del sector salud colombiano. Este hallazgo sugiere que la transición hacia la circularidad en este sector colombiano aún está retrasada en las prácticas que involucran el diseño de servicios para la circularidad, pues según la opinión de expertos no es una prioridad en este contexto. Por otra parte, las PIA, como sugiere la literatura, son determinantes en la toma de decisiones para la transición hacia la economía circular en estos sistemas productivos. Esto indica que la voluntad administrativa en las IPS, así como el apoyo y compromiso de los directivos respecto a las perspectivas de la EC es fundamental para orientar la institución hacia la sostenibilidad, pues estas iniciativas tendrán una fuerte influencia sobre otras.

El marco de priorización permite evidenciar de forma rápida cuales son las prácticas y sub-prácticas pertenecientes al grupo causa y al grupo efecto, a su vez que se identifica fácilmente cual es la práctica más importante y las sub-prácticas más importantes dentro de cada práctica. Con esta herramienta, un tomador de decisiones en IPS colombianas puede determinar en dónde enfocar sus esfuerzos y recursos, entendiendo las relaciones de influencia que unas prácticas tienen sobre otras.

El marco de priorización desarrollado funciona como una herramienta para la toma de decisiones en las instituciones prestadoras de servicios de salud en Colombia y pretende orientar este sector hacia la sostenibilidad de sus procesos a lo largo de su cadena de suministro.

REFERENCES

- [1] M. Farooque, A. Zhang, M. Thüerer, T. Qu, and D. Huisin, "Circular supply chain management: A definition and structured literature review," *J. Clean. Prod.*, vol. 228, pp. 882–900, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.303.
- [2] V. Duque-Urbe, W. Sarache, and E. V. Gutiérrez, "Sustainable supply chain management practices and sustainable performance in hospitals: A systematic review and integrative framework," *Sustain.*, vol. 11, no. 21, 2019, doi: 10.3390/su11215949.
- [3] M. Saroha, D. Garg, and S. Luthra, "Analyzing the circular supply chain management performance measurement framework: the modified balanced scorecard technique," *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, 2021, doi: 10.1007/s13198-021-01482-4.
- [4] L. I. Ordoñez Montilla, "LOGÍSTICA COLABORATIVA EN EL SECTOR SALUD. Caso logística de medicamentos y dispositivos médicos en la línea hospitalaria," Universidad ICESI., 2019.
- [5] S. Aguirre Araque and R. Burbano Muñoz, "Propuesta de diagnóstico del estado actual de la cadena de abastecimiento en el sistema de salud en Colombia.," Universidad ICESI., 2015.
- [6] S. M. Masoumik, S. H. Abdul-Rashid, and E. U. Olugu, "The development of a strategic prioritisation method for green supply chain initiatives," *PLoS One*, vol. 10, no. 11, 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0143115.
- [7] C. Khandelwal and M. K. Barua, "Prioritizing Circular Supply Chain Management Barriers Using Fuzzy AHP: Case of the Indian Plastic Industry," *Glob. Bus. Rev.*, 2020, doi: 10.1177/0972150920948818.
- [8] A. Kumar, E. K. Zavadskas, S. K. Mangla, V. Agrawal, K. Sharma, and D. Gupta, "When risks need attention: adoption of green supply chain initiatives in the pharmaceutical industry," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 57, no. 11, pp. 3554–3576, Jun. 2019, doi: 10.1080/00207543.2018.1543969.
- [9] J. J. Thakkar, *Multi-Criteria Decision Making*. Springer Singapore, 2021. doi: 10.1007/978-981-33-4745-8.
- [10] M. Saroha, D. Garg, and S. Luthra, "Identification and analysis of circular supply chain management practices for sustainability: a fuzzy-DEMATEL approach," *Int. J. Product. Perform. Manag.*, 2022, doi: 10.1108/IJPPM-11-2020-0613.
- [11] A. Chauhan, S. K. Jakhar, and C. Chauhan, "The interplay of circular economy with industry 4.0 enabled smart city drivers of healthcare waste disposal," *J. Clean. Prod.*, vol. 279, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123854.
- [12] S. Lahane and R. Kant, "Investigating the sustainable development goals derived due to adoption of circular economy practices," *Waste Manag.*, vol. 143, pp. 1–14, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.wasman.2022.02.016.
- [13] M. L. Tseng, H. M. Ha, K.-J. Wu, and B. Xue, "Healthcare industry circular supply chain collaboration in Vietnam: vision and learning influences on connection in a circular supply chain and circularity business model," *Int. J. Logist. Res. Appl.*, 2021, doi: 10.1080/13675567.2021.1923671.
- [14] C. Bai, S. Kusi-Sarpong, and J. Sarkis, "An implementation path for green information technology systems in the Ghanaian mining industry," *J. Clean. Prod.*, vol. 164, pp. 1105–1123, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.05.151.
- [15] J. P. Moreno, N. Velasco, and C. Rebolledo, "Prácticas logísticas hospitalarias : análisis de siete casos bogotanos," *Dep. Ing. Ind. Univ. los Andes, Bogotá, Colomb.*, *, p. 35, 2014.
- [16] Y. Liu, L. C. Wood, V. G. Venkatesh, A. Zhang, and M. Farooque, "Barriers to sustainable food consumption and production in China: A fuzzy DEMATEL analysis from a circular economy perspective," *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 28, pp. 1114–1129, 2021, doi: 10.1016/j.spc.2021.07.028.

Energy Use for Project Management Methods, Challenges and Trends. (2024)

Andrés Felipe Guio-González¹, Javier Arturo Orjuela-Castro², Elsa Cristina González-La Rotta³

Abstract— Framed within context of energy management in Colombia, this review paper explores the synergy between project management and energy use on a global scale. To identify new sustainable energy sources, Colombia actively promotes energy generation projects. Looking for effective management of these projects, a systematic review of the literature along with an analysis of the relationship between both fields, is presented. The study is structured around four main topics: Risks in energy use projects, life cycle analysis (LCA), BIM methodology for project management, multi-criteria decision-making tools like TOPSIS or NSGA-II. The main conclusion is the combination of those project management tools can lead to a methodology applicable to the Colombian context.

Index Terms— BIM, Energy Use, Heat Recovery, LCA, Life Cycle, NSGA-II, Project Management, TOPSIS

I. INTRODUCTION

The following literature review aims to show how the world, not just Colombia, manages its energy efficiency projects. It searched for project methodologies available in the main databases of scientific journals, using a search methodology described below. Then, the reader can identify and validate their projects based on the methodologies developed here.

This article is composed of three main sections. First, it presents historical data that relates project management to energy use. Second, it shows a methodology for the literature review during the last 5 years. Finally, it extracts and presents the data found.

II. EXPEDIENT

The Colombian National Development Plan for the period 2022-2026 (PND) established the strategic topics Number Four, for decarbonization and the implementation of non-carbon energy sources, which was called Transformation Productivity, Internationalization, and Climate Action section C.

These non-carbon energy sources include Conventional renewable energy sources (FNCER) such as wind, solar, geothermal, biomass, as well as other green energy sources. It seeks to promote energy security and reliability while also closing energy gaps in the nation (PND, “Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026”). It is supported by institutions like the Ministry of Mines and Energy, the Single Fund for Energy Solutions (FONENERGÍA), and the Mining and Energy

Planning Unit (UPME).

In addition to promoting FNCER investment, the PND also invites to private sector to invest in energy efficiency projects. This builds a market towards responsible consumption and establishes energy savings goals through the Rational and Efficient Use of Energy program (PROURE). Moreover, the PND provides political and economic guidelines with a vision for 2030. These guidelines are divided into four sectors: Residential, transportation, industrial, and tertiary, estimating a reduction from 2022 to 2030 of 523 PJ, 673 PJ, 256 PJ, and 131 PJ respectively. Specifically, in the industrial sector, the country focuses on reducing the potential for the use of indirect heat (39.3%), followed by direct heat (28.48%) and the measures of the Energy Management System (EMS). (21.68%).

In the PROURE program, four government incentives are established to promote investment in non-conventional energy source projects: exclusion IVA at the time of nationalization, for imported equipment whose objective is part of an energy efficiency project; discount or income deduction up to 20% for organizations that invest in self-generation and cogeneration; tariffs exemptions for nationalization and accelerated depreciation up to 20% annually for equipment purchased for energy efficiency (PROURE, “Programa de Uso Racional de Energía”).

With the Colombian energy panorama described above, it is necessary to ask ourselves about how Colombians manage energy projects in their territory. Additionally, what type of methods and what variation of methodologies exist for energy use projects, non-conventional sources of energy and the utilization of residual heat found in different industries so that the nation's energy objectives can be realized. For this, national and international information regarding projects management in the sector will be available.

III. EVOLUTION OF INVESTIGATION

In 1976, in a conference was held that focused on energy use, considerations, development, plant maintenance, project management, among other energy topics[1]. Early on, the study of project life cycles began; for example, [2] envisioned the possibility of using microcomputers for project management to study life cycle costs which could potentially help manage energy. Later, by 1993 [3] started to discuss the interaction of

¹ Andrés Felipe Guio-González: Master's student in Integral Project Management at the Francisco José de Caldas District University, Mechanical Engineer at the Francisco José de Caldas District University (e-mail: afguio@udistrital.edu.co)

² Javier Arturo Orjuela-Castro: PHD, MSC, Teacher and Researcher in Logistics and Supply Chain (e-mail: jorjuela@udistrital.edu.co)

³ Elsa Cristina González-La Rotta: PHD, MSC, Teacher and Researcher in Logistics and Supply Chain (e-mail: ecgonzalezl@udistrital.edu.co)

energy conservation measures (EMC) in buildings. The following year, in Ontario [4] cogeneration was studied, exploring the possibility of integrating multiple energy processes and considering economic benefits provided by government investments in these technologies to reduce the environment impact of energy processes.

In 1995[5] addressed simulation issues to generate energy scenarios in 94 regions of Asia. They implemented a model called Regional Air Pollution Information and Simulation Model (RAINS-ASIA), named so due to the environmental pollution suffered in that place. Five years later, in the 21st century in the United States was done strategies for energy benchmarking in cleanrooms and laboratory-type facilities a comparative study of energy consumption in buildings was conducted to identify and improve energy efficiency in high-tech centers by incorporating the study of clean energy.

In 2001 [6] began studying energy project management, applying logical framework methodology with slight modifications. In 2003 [7] published an article that applied a photosensitive lighting control system to save electrical resources, reducing consumption by 30%. That same year, [8] observed the benefits of combining hydraulic energy with the biomass combustion, generating combined cycles.

In "Hybrid life-cycle inventory for road construction and use" from 2004 work began on a methodology that would later be expanded during the development of this review article, called Life Cycle Assessment (LCA) This article used the LCA methodology to support decision-making with quantitative data for road construction, considering environmental impacts. Also in 2004, [9]. published an article on efficiency and innovations for Industrial Energy Efficiency which related decision-making to energy projects and described the main actors involved.

Five years later, in 2009, the importance of building efficiently became a necessity for the society of England and Wales, whose policies began to regulate the environmental impact of buildings, affecting subsequent projects in time and cost. [10] Two years later, in 2011, [11] wrote an article that also utilized LCA, this time for China. it dealing with the use of bamboo to replace concrete and brick to achieve better energy results. The simulation under the LEED standard (Leadership in energy and environmental design) was positive.

Subsequently, researchers continued to study ways to manage energy projects, as well as simulation tools for decision-making, multi-criteria decision-making, and risks present in the implementation of such projects over the past five years. There is a need to review agile methodologies for project management. A widely used methodology is BIM, mainly present in the construction sector and [12] use to evaluate the design of sustainable buildings.

By 2020, there was a wide variety of methodologies used to evaluate energy projects. One of them is system dynamics, [13] Which used to evaluate the impact of partner coordination for quality in construction. Years later, research focused on the use of different tools for project management, considering the variables such as time, cost, and scope. This is the case of [14], whose tool for analysis and subsequent decision-making is based on nonlinear programming (NLP), involving cost, quality

and energy. According to the authors, this model can be applied to a wide variety of sectors, including industrial, roads, construction, or manufacturing.

IV. SCIENTOMETRICS

The literature review of this article was carried out through scientific databases such as Scopus, ScienceDirect, and Google Scholar. A rigorous structure was followed based on that described by [15], which is divided into four stages: first, it defines a protocol and search strategy; subsequently, it determines inclusion and exclusion criteria; and then, it extracts, analyzes, synthesizes date, and finally presents a report similar to what is intended to be done with the present document but relating energy use projects (see Table I).

TABLE I
SEARCH METHODOLOGY

Stage	Strategy	No articles	Search engine
Search protocol and strategy	"Project Management" AND "Energy Use"	201	SCOPUS
	"Life Cycle" AND "heat recovery"	374	SCOPUS
	"Life Cycle" AND "Energy Use"	3688	SCOPUS
	"Project Management" AND "Energy Use"	16549	ScienceDirect
	"Life Cycle" AND "heat recovery"	8465	ScienceDirect
	"Life Cycle" AND "Energy Use"	187860	ScienceDirect
	"Project Management" AND "Heat Recovery" AND "Energy Use"	1850	Google Scholar
Review selection criteria	1. Last 5 years 2. Articles, Review 3. Key Word: Project Management, Energy Use, Energy Utilization 4. Open Access 5. Business, Management and Accounting	77	SCOPUS
	1. Last 5 years 2. Review Articles 3. Open Access 4. Energy 5. Journal of Environmental Management	145	ScienceDirect
	1. Last 5 years 2. Review Articles	70	Google Scholar
Data extraction	From the selected articles [8] were taken that were related to project management methodologies	40 articles for the conceptual framework	
	In addition to the methodologies, it was also found that when relating project management and energy use, one works with tools for multi-criteria decision making [11] articles found		

Stage	Strategy	No articles	Search engine
	Regarding the management of energy projects, the LCA tool is used for decision making, given its importance in the impact on the environment.		
Data synthesis and report	The most used project management methodologies and their stage are identified.	A theoretical conceptual framework is generated for the management of energy use projects.	
	The stages of projects in which LCA is used for decision making are analyzed.		
	The set of tools for multi-criteria decision making in the management of energy projects is analyzed.		

A. BIM for project management

Building Information Modeling (BIM), is a project management methodology commonly used in the engineering, architecture, and construction sector. It is based on 2D and 3D modeling to create simulations to detect errors and correct them in the early stages of projects. It is relevant to this research thanks to its features to plan a diverse variety of projects. The amount of information available that relates BIM to the energy sector is low. However, [16] carried out a review article identifying, among other things, the special interest that should be given to project teams. [17] used it, for example, in the maritime sector, to reduce fuel waste and HVAC systems, among other elements, achieving reductions in consumption, emissions, and also managed to standardize the process to apply the methodology with variations in the sector.

Over the last 10 years, the use of the BIM methodology for project management throughout its life cycle has increased. [18] used it by separating the life cycle into six stages where BIM generated benefits in each of them. Most of the available information is in the construction sector and relating energy efficiency. It discusses energy efficiency in buildings, as in [19], which simulated the construction of a residential building using BIM as a 3D graphic model, with the Autodesk NavisWork and Autodesk Building Studio tools.

BIM can be used in all stages of projects, but its full capacity is often not utilized, [20] identified through a review of the literature that 43% of the reviewed authors focused their research on energy analysis, leaving aside the potential of the methodology. In this case, it proposes to integrate sustainability and project life cycle. However, he is not the only author who talks about variable evaluation problems. [21] says that to contribute to the solution of this problem, the simulation based on BIM must be simplified and in addition, they develop an easy-to-use template.

Another virtue of BIM is that it can be used in combination with other project tools. In the case of energy efficiency projects, where there is predominant research on the Life Cycle Assessment (LCA) methodology to evaluate the impact on the environment. [22] and [23] managed to combine it, and the

results were positive in both studies.

B. LCA for project management

Life Cycle Assessment evaluates the environmental impact of a product by quantifying its effect on carbon footprint, from the extraction of raw materials to the recycling of the product. This concept comes from the ISO 14004 standard that is commonly used to evaluate elements within a process and its possible replacement. For project management, it is relevant because it allows decisions to be made based on its environmental impact. For energy projects, it is widely used because energy efficiency is usually considered within the framework of environmental protection.

In energy projects, LCA commonly used to compare materials and equipment that can be replaced to reduce their environmental impact. For example, [24] compared the emission of greenhouse gases and energy consumed between polystyrene and aluminum for the manufacture of air conditioners. [25] compared materials of fossil origin and products of biological origin in an oil extraction process, using biomass and planning renewable energy processes. In heat recovery processes it has also been used. [26] used it in a ceramic bathroom products factory and managed to reduce the carbon equivalent by 13%.

There are also other types of impacts that can be assessed by the LCA methodology: For example, [27] performed scientometrics to measure the effect generated by air conditioning gases on global warming. They evaluated 41 articles and proposed improvements through the use of renewable energy, especially in the operation phase of the air conditioning. [28] analyzed the decomposition of heavy metals through phytoremediation, where they also recommended waste alternatives with the leftover material in processes such as gasification or pyrolysis. It can also be evaluated, for example, how the life cycle of a building is affected by the number of inhabitants it houses [29].

Associated with LCA is the assessment of the cradle to the grave or circular economy, establishing as a basis the importance of having reliable information on materials, taking into account that, as the size of the project increases, so does the complexity of your systems [30]. For example, [31] used it to evaluate a high-speed train in Spain, identifying the systems and subsystems of the project. [32] used the LCA methodology to evaluate the life cycle of a shopping center, given the high turnover of materials and the high energy rates that this represents to give more importance to the selection of materials and thus achieve a reduction in environmental impact.

There is another methodology that evaluates projects as LCA, called Life Cycle Costing (LCC), where the life cycle is evaluated; however, the latter values the life cycle of the project only in terms of cost, leaving aside environmental aspects. LCA, on the other hand, can be combined with methodologies such as BIM, [22] combines the two methodologies for the renovation of residential buildings, [33] combines FPSO, a multi-objective mathematical model, and LCA to evaluate

performance in deep-water oil and gas production, potentially reducing emissions of up to 4.53% and economic reductions of 14.6%.

LCA can be combined with other project management tools, and when relating it to energy efficiency, various compositions emerge. For example, [23] uses BIM and LCA to evaluate the environmental impact of projects in the energy management of residential buildings, [34] It uses TOPSIS, a multi-criteria decision-making tool, and LCA to integrate energy systems, achieving savings of 53.08% with its model.

C Multi-criteria decision making for project management

In the review of the literature concerning project management and energy use, along with energy use and residual heat, multiple articles were found that included tools for multi-criteria decision making. The most used for this type of projects, and therefore, the most studied, are:

1) TOPSIS

TOPSIS, Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution, is a multi-criteria decision-making method that uses classification and selection of possible alternatives to facilitate decision making. In the context of energy use, [35] used it to combine excess heat in an industrial sector with the use of heat pumps to integrate with renewable energy sources in Aalborg Denmark. According to the author, the design can be used in other contexts. The versatility of TOPSIS allows it to generate combinations with other decision-making tools. For example, [36] used it in a combination it with NSGA-II and VIKOR in energy generation such as photovoltaic solar collectors, geothermal wells and the organic Rankine cycle, taking the temperature gradient as the determining variable for that decision making.

In the literature, the combination of NSGA-II and TOPSIS is found in several applications. [37] integrated them to harmonize municipal solid waste with solar energy, through the organic Rankine cycle, achieving optimal functioning. There are also authors who, for example, mix TOPSIS with AHP. This is the case of [38] which compared whether the duration of storage batteries could replace power plants based on natural gas combined cycle. In an integrated thermal system [39] demonstrated the multi-objective optimization approach to consider the best solutions by defining variables such as energy, supply, and demand adjustment, and environmental exergo-economic indices through the LCA evaluation, resulting in 53.08% energy savings and 43.5% cost savings. The tool is usually employed in the energy context when a decision needs to be made in an integrated energy system. For example, [40] used it to minimize carbon emissions and energy consumption without increasing the economic costs associated with it.

2) NSGA II

Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) is a multi-objective optimization methodology that works to make decisions in projects with a series of determined and evaluated parameters, it mainly consists of reproducing different

combinations of variables and the result of these combinations, For example [41] evaluated the state of the art for optimization methodologies and decision making in heat recovery technologies, they found that it was used to work on the organic rankine cycle and the variables of the case were different working fluids. [42] used the tool in MATLAB with an integrated renewable energy system, combining solar panels, geothermal energy, gas turbines, absorption cycles, ground heat pumps and electrical and thermal storage units, resulting in a performance improvement in traditional systems of 36.4% in economic, 47.9% in energy and 60.7% in environmental terms. Additionally, authors [36] and [37] not only used the tool, but combined it with TOPSIS and VIKOR.

3) System dynamics (SD)

Research in the last 20 years on system dynamics has been increasing, SD is a simulation technique that is usually used for decision making in projects and public policy planning, [43] used SD to evaluate carbon mitigation strategies in the cement industry, there compared carbon mitigation strategies with variables such as their scope, model description, tested scenarios and mitigation methods highlighted In UK[44] used the system dynamics approach in the construction industry to take advantage of energy resources in a better way and achieve a decrease in energy consumption in terms of time, [45] evaluated energy consumption in buildings by means of system dynamics simulation, determining the performance of the model focused on indoor environmental quality and CO₂ emissions to contribute to both the industry and policy makers.

D Energy recovery projects risks

Additionally, in this literature review, a large number of articles deal with relevant topics for project management, such as the risks associated with its implementation, This I why the main risks found will be discussed: For example, [46] uses reference class forecasting (RCF) to identify risks in an energy case study. The RCF is based on the identification of possible cost overruns by referencing similar projects to the one being evaluated. This method consists of three stages: compiling a number of projects to obtain reliable statistical data, establishing a probability distribution of the selected parameters, and finally comparing it with the case study to estimate possible results.

In urban energy development, problems arise, such as those described by [47] who identified, through interviews with stakeholders, that the main problems are knowledge and fear when implementing new energy-efficient technologies. These barriers are associated with the planning phase of the programs and projects. [48] collected information through 20 interviews to identify the main barriers to energy efficiency in construction. They mentioned a lack of money, split incentives, lack of standards and procedures, low electricity prices, lack of regulations, lack of knowledge, and that the industry's comfort zone. In Additionally, they mentioned drivers for implementing new technologies, such as regulations, internal education, and support from managers and site managers.

Investment recovery is also an issue identified by [49], pointed out the high costs of acquiring technological equipment and the uncertainty of the models as barriers to large-scale implementation of energy efficiency projects. Reducing the impact on barriers requires reduced time periods, which can be

achieved with the government subsidies or by helping potential projects approach potential financiers aligned with energy politics. [50] mentions the importance of the social dimensions of energy efficiency projects, given the relevance of people in the sustainability of this type of projects.

Another issue identified in the literature review was the lack of standardization of processes. For example, [51] found barriers in the standardization of specification requirements, knowledge of similar projects and respective tools to track changes in performance. [52] studies retrofitting in residential buildings, identifying issues such as owners' purchasing power, lack of knowledge about energy efficiency programs, standardization of project delivery and quantifiable measurement tools to track performance changes.

Many of the articles found when relating energy efficiency and problems deal with studies of social housing, residential buildings, and air conditioners. For example, [53] discussed thermal efficiency in five case studies of social housing in the United Kingdom, identifying problematic management of the quality plan, leaving aside other relevant aspects in terms of thermal performance. They determined that a significant problem was that the United Kingdom standard was left as a minimum requirement, and contractors did not assign resources to deliver thermal quality formalities.

In Malaysia, a tropical country like Colombia, there is a growing concern about the construction of energy-efficient buildings. Among the problems encountered are institutional frameworks, organizational culture, group pressure, lack of information, and behavioral discrepancies among occupants. As a consequence, [54] proposes designing and building with future inhabitants in mind, defining energy objectives from planning, determined the use of human and material resources, standardization of the procedure, and creating an energy action plan. This could be achieved with the approach proposed by [55], which outlines five approaches for efficient rehabilitation of residential buildings, establishes ten stages of modernization and all of them are determined by evaluation risk (related to performance diagnostic techniques), sequence (decision making for short- and long-term constructions) and communication (mechanisms to transmit information).

The

Fig 1 shows the four topics on which this article worked and in which stage of the project life cycle the greatest findings are reported; this does not imply that the tools are not used in other stages.

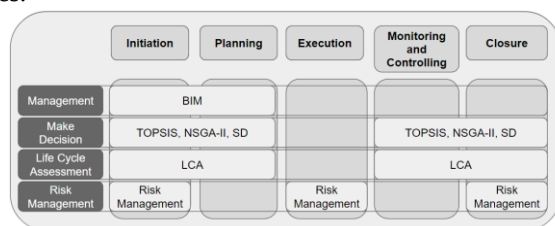


Fig 1 Life cycle in project management

IV. CONCLUSIONS

Through the systematic search for information, a connection between project management and energy utilization has been established. In this context, it has been identified that BIM

methodology is being investigated and applied in the energy project stages, particularly in the planning phase. Its potential is not limited to the initial stages, as the information gathered indicates that BIM can be used effectively in all phases of a project. In view of the above, the next step in this line of research is to integrate BIM methodology with other project management tools, such as LCA or multi-criteria decision-making tools. This integration will further optimize the use of energy in projects and promote more sustainable practices.

Energy efficiency is framed in a context of resource optimization and sustainable economy, which explains the constant presence of Life Cycle Analysis (LCA) in research in this field. In fact, some authors have already combined LCA with methodologies such as BIM, opening the door to its application in other analyses related to project management. The methodology can be used at all stages of projects, but it is mainly used for environmental impact planning in the early stages, or at the end of the product life cycle, to measure impacts and replace characteristic elements of each project.

Decision making is a constant in projects, and in the case of energy efficiency projects, tools such as TOPSIS, NSGA-II or SD, all of which are used in project planning, stand out. The virtue of these tools is that they help project planners to decide based on quantitative data and that they easily adapt to different scenarios. Future research can combine the tools to find the one that delivers the best results and mix them, in turn, with methodologies such as BIM for project management or LCA for assessing environmental impacts.

Finally, this article evaluated the different risks in projects evidenced in research articles, these risks can be found in all stages of the projects, the findings indicate that in planning the risks are mainly in the lack of standardization of processes, government aid or stakeholder analysis, in execution stages the risks are associated with poorly selected materials, In the execution stages the risks are associated with poorly selected materials, construction without a correct stakeholder analysis or their purchasing power, barriers in financing, uncertainty in implementing these projects and correct mechanisms for transmitting information, it is hoped that in the future, all these problems can be characterized and standardized so that the projects will be more successful in their execution.

From the findings presented in this document, it is concluded that the recommended project management methodology for Colombia, in the framework of energy efficiency projects, is BIM, but the literature review showed aspects to consider in the planning and construction of these projects, so it is recommended to integrate BIM methodology with LCA to assess environmental impacts of the project and TOPSIS to make multi-criteria decisions.

REFERENCES

- [1] A. I. of P. Engineers, *Conference Proceedings: 1976 AIPE International Plant Engineering Conference, Montreal, Canada, June 1-3, 1976*. American Institute of Plant Engineers, 1976.
- [2] B. I. Benator, "Microcomputer applications in energy management," *Journal of Microcomputer*

- Applications*, vol. 10, no. 1, pp. 1–9, Jan. 1987, doi: 10.1016/0745-7138(87)90031-5.
- [3] S. W. Crown, M. B. Pate, and H. N. Shapiro, “Method to account for energy conservation measure interactions,” in *ASHRAE Transactions*, 1993, pp. 201 – 206.
- [4] N. Markettos, R. P. Mahant, and H. Husain, “Environmental improvements driven by economic benefits,” in *Proc Int Symp Res Conserv Environ Technol Metall Ind*, 1994, pp. 241 – 252.
- [5] W. Foell *et al.*, “Energy use, emissions, and air pollution reduction strategies in Asia,” *Water Air Soil Pollut*, vol. 85, no. 4, pp. 2277–2282, 1995, doi: 10.1007/BF01186173.
- [6] D. Curtis, “Finding energy in strategic project management: an essay in honour of Dean Fang,” *Public Administration and Development: The International Journal of Management Research and Practice*, vol. 21, no. 4, pp. 297–307, 2001.
- [7] S. Onaygil and Ö. Güler, “Determination of the energy saving by daylight responsive lighting control systems with an example from Istanbul,” *Build Environ*, vol. 38, no. 7, pp. 973–977, Jul. 2003, doi: 10.1016/S0360-1323(03)00034-9.
- [8] L. B. Oliveira and L. P. Rosa, “Brazilian waste potential: energy, environmental, social and economic benefits,” *Energy Policy*, vol. 31, no. 14, pp. 1481–1491, Nov. 2003, doi: 10.1016/S0301-4215(02)00204-5.
- [9] C. Dieperink, I. Brand, and W. Vermeulen, “Diffusion of energy-saving innovations in industry and the built environment: Dutch studies as inputs for a more integrated analytical framework,” *Energy Policy*, vol. 32, no. 6, pp. 773–784, Apr. 2004, doi: 10.1016/S0301-4215(02)00341-5.
- [10] N. G. D. Hamza, “Energy conservation regulations: Impacts on design and procurement of low energy buildings.” doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.010>
- [11] D. R. Y. Yu, “A future bamboo-structure residential building prototype in China: Life cycle assessment of energy use and carbon emissi doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.013>
- [12] A. M. Abo. elsaud, Y. Abdelalim, “Integrating BIM-Based Simulation Technique for Sustainable Building Design” doi:
- [13] G. Papachristos *et al.*, “Low carbon building performance in the construction industry: A multi-method approach of project management operations and building energy use applied in a UK public office building,” *Energy Build*, vol. 206, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109609.
- [14] R. Lotfi, Z. Yadegari, S. H. Hosseini, A. H. Khameneh, E. B. Tirkolaee, and G.-W. Weber, “A robust time-cost-quality-energy-environment trade-off with resource-constrained in project management: a case study for a bridge construction project,” *Journal of Industrial and Management Optimization*, vol. 18, no. 1, pp. 375–396, 2022, doi: 10.3934/jimo.2020158.
- [15] D. L. Rincón Ballesteros, J. E. Fonseca Ramírez, and J. A. Orjuela-Castro, “Hacia un Marco Conceptual Común sobre Trazabilidad en la Cadena de Suministro de Alimentos,” *Ingeniería*, vol. 22, no. 2, p. 161, May 2017, doi: 10.14483/udistrital.jour.reving.2017.2.a01.
- [16] S. Jarosz, M. Sołtysik, M. Zakrzewska, K. Włodyka, C. Mesjasz, and A. Kozłowski, “Innovation and sustainability as a crucial trend in energy sector project management - literature review,” *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*, vol. 2022, Jul. 2022, doi: 10.29119/1641-3466.2022.157.11.
- [17] A. Buonomano, G. Del Papa, G. Francesco Giuzio, R. Maka, and A. Palombo, “Advancing sustainability in the maritime sector: energy design and optimization of large ships through information modelling and dynamic simulation,” *Appl Therm Eng*, vol. 235, p. 121359, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.121359.
- [18] T. Wang and H. M. Chen, “Integration of building information modeling and project management in construction project life cycle,” *Autom Constr*, vol. 150, p. 104832, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.AUTCON.2023.104832.
- [19] K. Venkatesh, S. Ch, V. Lute, and D. C. K. Jagarapu, “BIM based approach for cost and energy estimation of a multi storied residential building,” in *AIP Conference Proceedings*, P. Poluraju, S. H. Jeelani, J. D. C. Kumar, M. A. K. Reddy, and K. H. Raja, Eds., American Institute of Physics Inc., 2023. doi: 10.1063/5.0144157.
- [20] Z. A. Shukra and Y. Zhou, “Holistic green BIM: a scientometrics and mixed review,” *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 28, no. 9, pp. 2273–2299, 2021, doi: 10.1108/ECAM-05-2020-0377.
- [21] A. M. Abdelalim and Y. Abo.elsaud, “Integrating BIM-Based Simulation Technique for Sustainable Building Design,” in *Sustainable Civil Infrastructures*, M. Shehata and F. Rodrigues, Eds., Springer Science and Business Media B.V., 2019, pp. 209–238. doi: 10.1007/978-3-030-01905-1_12.
- [22] A. Dauletbek and P. Zhou, “BIM-based LCA as a comprehensive method for the refurbishment of existing dwellings considering environmental compatibility, energy efficiency, and profitability: A case study in China,” *Journal of Building Engineering*, vol. 46, p. 103852, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.JOBE.2021.103852.
- [23] Manika Bajracharya, “An assessment of Building Energy Management Systems (BEMS) and Data-driven Life cycle engi-neering (LCE) in AEC projects Manika Bajracharya,” 2023.
- [24] H. Marques, M. Oliveira, and N. Martins, “Innovative polymeric air–air heat recovery system — Life cycle assessment,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 429–435, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.EGYR.2019.08.084.
- [25] M. Montazeri and M. J. Eckelman, “Life cycle assessment of UV-Curable bio-based wood flooring

- coatings,” *J Clean Prod*, vol. 192, pp. 932–939, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.209.
- [26] H. Monteiro, P. L. Cruz, and B. Moura, “Integrated environmental and economic life cycle assessment of improvement strategies for a ceramic industry,” *J Clean Prod*, vol. 345, p. 131173, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.131173.
- [27] J. Litardo, D. Gomez, A. Boero, R. Hidalgo-Leon, G. Soriano, and A. D. Ramirez, “Air-conditioning life cycle assessment research: A review of the methodology, environmental impacts, and areas of future improvement,” *Energy Build*, vol. 296, p. 113415, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2023.113415.
- [28] A. H. A. Khan *et al.*, “Sustainability of phytoremediation: Post-harvest stratagems and economic opportunities for the produced metals contaminated biomass,” *J Environ Manage*, vol. 326, p. 116700, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2022.116700.
- [29] V. W. Y. Tam, L. M. M. C. E. Almeida, and K. N. Le, “Occupant behaviour and its implications in energy use - A literature review,” in *Proceedings of 22nd International Conference on Advancement of Construction Management and Real Estate, CRIOCM 2017*, P. X. W. Zou, J. Sanjayan, M. Alam, and X. Xu, Eds., CRIOCM 2017 Organising Committee, 2019, pp. 1214–1221.
- [30] E. Giama and A. M. Papadopoulos, “Benchmarking carbon footprint and circularity in production processes: The case of stonewool and extruded polystyrene,” *J Clean Prod*, vol. 257, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120559.
- [31] A. Kortazar, G. Bueno, and D. Hoyos, “Is high-speed rail a sustainable mobility option? A life-cycle assessment of the Basque Y project in Spain,” *Environ Impact Assess Rev*, vol. 103, 2023, doi: 10.1016/j.eiar.2023.107276.
- [32] K. K. Weththasinghe, “The significance of the life cycle embodied energy in shopping centres in Australia,” in *Proceedings of 22nd International Conference on Advancement of Construction Management and Real Estate, CRIOCM 2017*, P. X. W. Zou, J. Sanjayan, M. Alam, and X. Xu, Eds., CRIOCM 2017 Organising Committee, 2019, pp. 305–315.
- [33] Z. Li *et al.*, “Reducing carbon footprint of deep-sea oil and gas field exploitation by optimization for Floating Production Storage and Offloading,” *Appl Energy*, vol. 261, p. 114398, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.APENERGY.2019.114398.
- [34] Y. Chen, Z. Xu, J. Wang, P. D. Lund, Y. Han, and T. Cheng, “Multi-objective optimization of an integrated energy system against energy, supply-demand matching and exergo-environmental cost over the whole life-cycle,” *Energy Convers Manag*, vol. 254, p. 115203, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2021.115203.
- [35] M. Yuan, J. Z. Thellufsen, P. Sorknæs, H. Lund, and Y. Liang, “District heating in 100% renewable energy systems: Combining industrial excess heat and heat pumps,” *Energy Convers Manag*, vol. 244, p. 114527, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114527>.
- [36] W. Wang *et al.*, “Multi-aspect investigation and multi-criteria optimization of a novel solar-geothermal-based polygeneration system using flat plate and concentrated photovoltaic thermal solar collectors,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 174, pp. 485–509, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.PSEP.2023.03.023.
- [37] L. Wang, M. P. R. Teles, H. Yu, B. V. F. Silva, and A. Arabkoohsar, “Waste incineration and heat recovery hybridized with low-focus fresnel lens solar collectors for sustainable multi-generation; A thorough techno-economic-environmental analysis and optimization,” *Chemosphere*, vol. 346, p. 140409, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2023.140409.
- [38] M. Bulut and E. ÖZCAN, “Integration of Battery Energy Storage Systems into Natural Gas Combined Cycle Power Plants in Fuzzy Environment,” *J Energy Storage*, vol. 36, p. 102376, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.EST.2021.102376.
- [39] Y. Chen, Z. Xu, J. Wang, P. D. Lund, Y. Han, and T. Cheng, “Multi-objective optimization of an integrated energy system against energy, supply-demand matching and exergo-environmental cost over the whole life-cycle,” *Energy Convers Manag*, vol. 254, p. 115203, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2021.115203.
- [40] X. Zhou, W. Tan, Y. Sun, T. Huang, and C. Yang, “Multi-objective optimization and decision making for integrated energy system using STA and fuzzy TOPSIS,” *Expert Syst Appl*, vol. 240, p. 122539, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.ESWA.2023.122539.
- [41] A. Kumar and D. Rakshit, “A critical review on waste heat recovery utilization with special focus on Organic Rankine Cycle applications,” *Clean Eng Technol*, vol. 5, p. 100292, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.CLET.2021.100292.
- [42] J. Xu, Y. Chen, J. Wang, P. D. Lund, and D. Wang, “Ideal scheme selection of an integrated conventional and renewable energy system combining multi-objective optimization and matching performance analysis,” *Energy Convers Manag*, vol. 251, p. 114989, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2021.114989.
- [43] A. Kunche and B. Mielczarek, “Application of system dynamic modelling for evaluation of carbon mitigation strategies in cement industries: A comparative overview of the current state of the art,” Mar. 01, 2021, MDPI AG. doi: 10.3390/en14051464.
- [44] G. Papachristos *et al.*, “Low carbon building performance in the construction industry: A multi-method approach of project management operations and building energy use applied in a UK public office building,” *Energy Build*, vol. 206, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109609.
- [45] G. Papachristos *et al.*, “Low carbon building performance in the construction industry: a multi-

method approach of system dynamics and building performance modelling,” *Construction Management and Economics*, vol. 38, no. 9, pp. 856–876, 2020, doi: 10.1080/01446193.2020.1748212.

- [46] R. Baerenbold, “Reducing risks in megaprojects: The potential of reference class forecasting,” *Project Leadership and Society*, vol. 4, p. 100103, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.PLAS.2023.100103.
- [47] J. Carlander and P. Thollander, “Barriers to implementation of energy-efficient technologies in building construction projects — Results from a Swedish case study,” *Resources, Environment and Sustainability*, vol. 11, 2023, doi: 10.1016/j.resenv.2022.100097.
- [48] J. Palm and E. Bryngelson, “Energy efficiency at building sites: barriers and drivers,” *Energy Effic*, vol. 16, no. 2, 2023, doi: 10.1007/s12053-023-10088-7.
- [49] Z. Yu *et al.*, “Supportive governance for city-scale low carbon building retrofits: a case study from Shanghai,” *Climate Policy*, vol. 21, no. 7, pp. 884–896, 2021, doi: 10.1080/14693062.2021.1948383.
- [50] N. Q. Minh, “Exploring social dimensions of achieving energy efficiency in urban housing design—a case study from hanoi (Vietnam),” *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 228–239, 2021, doi: 10.30880/ijscet.2021.12.01.023.
- [51] K. Boquet, C. Froitier, J. Li, K. Xu, and X. Zeng, “Eco-districts in France: What tools to ensure goals achievement?,” *Sci China Earth Sci*, vol. 63, no. 6, pp. 865–874, 2020, doi: 10.1007/s11430-018-9605-4.
- [52] M. Safari, S. Asadi, and J. Freihaut, “Business Development in Small Commercial Building Energy Retrofit Projects A Review on Current Industry Practices,” in *Construction Research Congress 2020: Project Management and Controls, Materials, and Contracts - Selected Papers from the Construction Research Congress 2020*, D. Grau, P. Tang, and E. A. M, Eds., American Society of Civil Engineers (ASCE), 2020, pp. 1366–1374.
- [53] J. Alencastro, A. Fuertes, and P. De Wilde, “Quality management in UK social housing projects: Addressing thermal performance,” in *ARCOM 2020 - Association of Researchers in Construction Management, 36th Annual Conference 2020 - Proceedings*, L. Scott and C. J. Neilson, Eds., Association of Researchers in Construction Management, 2020, pp. 156–165.
- [54] C. C. Ohueri, W. I. Enegbuma, P. Ekambaram, M. N. H. Wong, and K. K. Kuok, “Energy efficiency framework for Malaysia’s green office building occupants,” in *Proceedings of 22nd International Conference on Advancement of Construction Management and Real Estate, CRIOCM 2017*, P. X. W. Zou, J. Sanjayan, M. Alam, and X. Xu, Eds., CRIOCM 2017 Organising Committee, 2019, pp. 820–827.
- [55] M. Topouzi, G. Killip, T. Fawcett, and A. Owen, “Deep retrofit approaches: Managing risks to minimise the energy performance gap,” in *Eceee*

Summer Study Proceedings, European Council for an Energy Efficient Economy, 2019, pp. 1345–1354.

Adaptación del Método de Gestión del Valor Ganado (EVM) a Proyectos con Metodología Scrum: Una Revisión de Literatura

Edilberto Hinestroza Obregón¹; Feizar Javier Rueda Velasco²

Resumen— Este artículo a través de la revisión de la literatura analiza la adaptación de la Gestión del Valor Ganado (EVM) en proyectos ágiles con metodología Scrum, resaltando los desafíos que plantea su flexibilidad y entregas incrementales. Como resultado se identifican avances y vacíos, destacando la necesidad de un marco estandarizado para mejorar la evaluación del desempeño y la gestión en entornos ágiles.

Palabras Claves — Control de proyectos ágiles, Gestión del Valor Ganado (EVM), Metodología Scrum, Revisión de literatura.

Abstract— This article, through a literature review, analyzes the adaptation of Earned Value Management (EVM) in agile projects with Scrum methodology, highlighting the challenges posed by its flexibility and incremental deliveries. As a result, progress and gaps are identified, highlighting the need for a standardized framework to improve performance evaluation and management in agile environments.

Index Terms— Agile project control, Earned Value Management (EVM), Literature review, Scrum Methodology.

I. INTRODUCCIÓN

EN el ámbito de la gestión de proyectos, el control juega un papel fundamental en la supervisión y dirección de las actividades necesarias para alcanzar los objetivos establecidos [1]. Esta disciplina ha sido moldeada por una variedad de métodos y técnicas que abarcan desde enfoques tradicionales hasta metodologías emergentes, cada uno con sus propias características y enfoques para garantizar el éxito del proyecto. El control de proyectos se puede definir como el proceso de monitorear, medir, evaluar y ajustar el progreso de las actividades de un proyecto, garantizando así el éxito y la entrega oportuna de los resultados esperados. La importancia de controlar proyectos radica en su capacidad para mitigar riesgos, optimizar el uso de recursos y garantizar el cumplimiento de objetivos [1]. Un control efectivo permite detectar desviaciones en el desempeño del proyecto y tomar medidas correctivas oportunas para mantener el proyecto en el camino correcto [2].

El control y seguimiento de proyectos en cada uno de los enfoques de la gestión de proyectos tanto en el enfoque predictivo o tradicional como en el adaptativo o ágil se desarrolla de una manera específica y particular, en los enfoques predictivos las medidas de desempeño se enfocan específicamente en gestión del tiempo, gestión del costo y la gestión del alcance, mientras que, en el enfoque ágil, las medidas de desempeño se centran más en entrega constante incremental de producto al cliente, priorización de las actividades basada en la entrega de valor para el cliente, gestión del riesgo y la gestión backlog de producto [2].

En cuanto a los métodos de control de proyectos existen varios en los enfoques predictivos dentro de los cuales se destacan el diagrama de Gantt, Pert/CPM y el método de gestión de valor ganado (EVM) que es el que se va a usar en esta investigación como base, y en los enfoques ágiles se reconocen principalmente el Burn-UpChart, Burn-Down Chart, los Tableros Kanban.

El método de Gestión del valor ganado (EVM) por sus siglas en inglés, es un método de control de proyectos con enfoque predictivo o tradicional que combina mediciones de alcance, tiempo y costos para ayudar a evaluar y medir el desempeño y el progreso de un proyecto de manera objetiva y sistemática. Se utilizan tres métricas clave para rastrear el progreso del proyecto: valor planificado (PV), costo real (AC) y valor ganado (EV). PV es el valor del trabajo que se planea completar en una fecha determinada, AC es el costo real del trabajo que se ha completado en una fecha determinada y EV es el valor del trabajo que se ha completado en una fecha determinada, según el plan del proyecto. EVM se puede utilizar para identificar y mitigar problemas con el proyecto, como sobrecostos y retrasos en el cronograma. [3].

Aunque el EVM ha demostrado ser eficaz en la medición del desempeño de proyectos ágiles en términos de tiempo y costo, es fundamental reconocer que los enfoques ágiles incorporan nuevas dinámicas y prioridades en el proceso de control. Por ello, es necesario adaptar las métricas de desempeño del EVM para el control de proyectos ágiles, de modo que se satisfagan

1. Ingeniero de Producción, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Grupo de Investigación: ARCOSES, Profesor asociado Programa Ingeniería Industrial Universidad Los Libertadores, Ingeniero de Procesos MTA DE COLOMBIA SAS, Correo Electrónico: ehinestrozao@udistrital.edu.co, ehinestrozao@libertadores.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1099-8180>.

2. Ingeniero Industrial, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Magister en Ingeniería Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Doctorado Ingeniería- Industria y Organizaciones, Universidad Nacional de Colombia, Grupo de Investigación: ARCOSES, Docente de Planta, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Correo Electrónico: fjruedav@udistrital.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0109-9204>.

las demandas de flexibilidad y capacidad de respuesta a los cambios [4]. Según el PMBOK (2021) el enfoque adaptativo para la gestión de proyectos o como más se conoce enfoque ágil es un enfoque iterativo e incremental en el que los proyectos se dividen en ciclos cortos, como los sprints, cada uno de ellos termina en un producto funcional que se puede entregar al cliente para recibir comentarios, y luego, la retroalimentación se utiliza para mejorar el producto en el siguiente sprint. En cada entrega se realizan todas las fases del ciclo: desde la toma de requerimientos, diseño, verificación y entrega [5]. La mayor diferencia de las metodologías ágiles frente a las tradicionales es que en los procesos ágiles se entrega valor constantemente y se recibe retroalimentación durante todo el proyecto. El enfoque adaptativo se utiliza a menudo para proyectos complejos con requisitos cambiantes.

La gestión de proyectos ágiles se basa en los principios del agilismo, un enfoque que promueve la flexibilidad, la colaboración y la adaptación continua [6]. Estos principios, que incluyen satisfacer a los clientes mediante la entrega temprana y continua de producto valioso, dar la bienvenida a los requisitos cambiantes, incluso en las últimas etapas del desarrollo, los procesos ágiles aprovechan el cambio para lograr la ventaja competitiva del cliente, entregar de producto funcional con frecuencia al cliente entre otros.

Estos valores y principios son la base por los cuales funcionan por los proyectos con enfoque ágil, por ende, son las variables y medidas de desempeño que agregar valor al control de este tipo de proyecto, por lo tanto, es fundamental que la aplicación del EVM en proyectos ágiles vaya más allá de simplemente medir el tiempo y el costo. Debe incluir variables y medidas de desempeño que reflejen los principios y valores del Manifiesto Ágil, como la satisfacción del cliente, la calidad del producto entregado, la adaptabilidad a los cambios y la capacidad de entrega continua [7].

Existen alrededor de una docena de metodologías ágiles que se utilizan actualmente. Los más comunes son Scrum, Extreme Programming (XP), Feature-Driven Development (FDD), Dynamic Systems Development Method (DSDM) entre otros [8]. Las metodologías más usadas de las anteriormente mencionadas son el Scrum, Kanban y XP, pero este documento específicamente se centra en la revisión y análisis bibliográfico relacionado con la aplicación o adaptación del EVM a la metodología Scrum.

La metodología Scrum, según el PMBOK (2021), es un marco de trabajo ágil que incluye entregas rápidas y un alto poder de decisión del equipo. Es ideal para proyectos de desarrollo de software, marketing y de otras áreas donde se requiere llegar a objetivos en el menor tiempo posible y con una gran flexibilidad para satisfacer las necesidades del cliente [4]. Es un enfoque de trabajo colaborativo en equipo para obtener resultados óptimos en proyectos. Se caracteriza por entregas parciales y regulares del producto final, priorizando el beneficio del receptor.

En los proyectos ágiles que utilizan la metodología Scrum, la fase de control es de vital importancia ya que permite a los equipos de Scrum monitorear el progreso, identificar

desviaciones del plan original y tomar medidas correctivas de manera oportuna. Esto es crucial para asegurar que se entregue valor al cliente de manera continua y consistente. Además, el control en Scrum no solo se refiere al seguimiento del trabajo, sino también a la calidad del producto, la satisfacción del equipo y la alineación con los objetivos del negocio [9].

Como se había mencionado entre los métodos más comunes de control de proyectos en metodología Scrum se encuentran el Burn-Up Chart, el Burn-Down Chart, los Tableros Kanban. El Burn-Up Chart es una representación gráfica del trabajo completado en comparación con el trabajo total estimado a lo largo del tiempo [9]. Muestra la progresión acumulativa del trabajo completado y proporciona una visión clara del alcance del proyecto. Por otro lado, el Burn-Down Chart es otra herramienta visual que muestra la cantidad de trabajo restante a lo largo del tiempo [10]. A diferencia del Burn-Up Chart, el Burn-Down Chart representa la disminución del trabajo pendiente en lugar de su aumento.

Los Tableros Kanban, por otro lado, son sistemas visuales que permiten a los equipos gestionar y visualizar el flujo de trabajo y el estado del proyecto [11]. Consisten en columnas que representan diferentes etapas del proceso, como "pendiente", "en progreso" y "completado". Las tarjetas de trabajo se mueven a través del tablero, desde la columna inicial hasta la final, a medida que avanzan en el proceso.

Las medidas de desempeño para estos métodos de control de proyectos ágiles son fundamentales para evaluar la eficacia y el progreso del proyecto. Algunas medidas comunes incluyen:

- Velocidad del equipo: Esta medida se refiere a la cantidad de trabajo que un equipo puede completar en un período de tiempo determinado, como una iteración o sprint.
- Tiempo de ciclo: Es el tiempo total que lleva completar una tarea, desde el momento en que se inicia hasta que se marca como completada.
- Capacidad de entrega: Esta medida evalúa la capacidad del equipo para cumplir con las expectativas de entrega dentro de los plazos establecidos.
- Throughput: Es la cantidad de trabajo que se completa en un período de tiempo determinado.

II. METODOLOGÍA

El desarrollo de este artículo se basa en identificar los avances, retos y oportunidades del método de gestión de valor ganado aplicado a los proyectos con metodología Scrum que permitan sentar las bases de futuras investigaciones relacionadas. Por lo anterior se definen las siguientes preguntas que guiarán el proceso teniendo en cuenta el objetivo.

Preguntas guía de la revisión

El presente artículo se desarrolla por medio de la búsqueda e identificación de las publicaciones que responden al menos una de las 2 preguntas guía de la revisión las cuales son:

Q1. ¿El artículo incluye la descripción de los métodos y técnicas de la aplicación o integración de la gestión del valor ganado a los proyectos con metodología Scrum?

Q2. ¿El artículo desarrolla muestra las medidas de desempeño trabajadas en el método de control de proyectos y las contrasta con las medidas de desempeño originales de EVM?

Estas preguntas se complementan con la adición de criterios de inclusión y exclusión.

Criterios de inclusión

IC1: Los artículos deben haber sido revisados por pares

IC2: Los artículos deben estar escritos en inglés

IC3: Los artículos deben tener una antigüedad no mayor a 10 años de antigüedad

IC4: Los artículos deben tener relación directa con la gestión del valor ganado aplicado en los proyectos ágiles.

IC5: Los artículos deben estar publicados en revistas indexadas

Criterios de exclusión

EC1: El artículo no tiene aplicabilidad en la gestión del valor ganado en los proyectos ágiles.

EC2: El artículo no tiene un desarrollo de la metodología en forma clara o válida

EC3: El artículo no está disponible

Estrategia de Búsqueda

Para buscar y analizar la literatura existente sobre la gestión del valor ganado aplicado a los proyectos con metodología Scrum, se realizó una revisión sistemática de la literatura en la base de datos y buscadores relacionados con el tema que están disponibles online, entre ellos se encuentran Scopus, IEEE Xplore, ACM, Springer, Elsevier, Researchgate, Science Direct y Google Scholar.

La búsqueda se realizó usando las siguientes palabras clave:

- Earned value management – EVM - Earned value
- Agile project control - Scrum Methodology
- Measuring value in agile projects - Project control
- Agile projects

Teniendo en cuenta las anteriores palabras claves y los operadores booleanos se formó la ecuación de búsqueda y se realizó la revisión sistema de literatura, a continuación, se muestra:

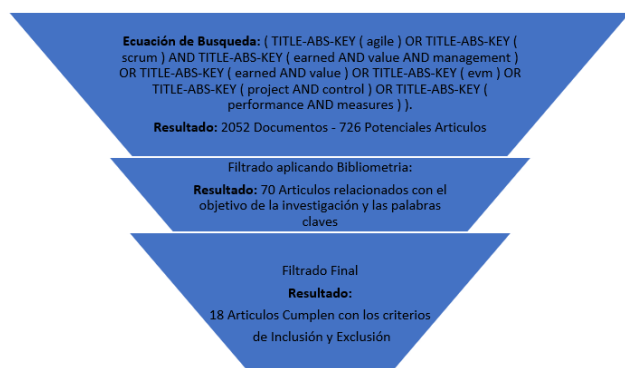


Ilustración 1. Revisión Sistema de Literatura. Fuente Propia

III. RESULTADOS Y HALLAZGOS

Después de filtrar los artículos que abordan la relación entre la gestión del valor ganado y la gestión de proyectos ágiles, se llevará a cabo una comparación y análisis detallado de los estudios más relevantes sobre esta temática. El primero que comenzó a hablar del método EVM en enfoques ágiles fue la metodología AgileEVM desarrollada en un artículo escrito por Tamara, Brent, & Tomás en 2006 [12] , donde explican como la metodología EVM usada en un enfoque predictivo se puede adaptar a un enfoque ágil específicamente en Scrum. Los autores del AgileEVM proponen adaptar las medidas de desempeño del EVM tradicional en el control de proyectos ágiles mediante diferentes criterios y estos son: Centrándose en la naturaleza iterativa e incremental de los proyectos ágiles, usando métricas simples y fáciles de usar y ser flexible y adaptable al cambio. Establecen que el concepto de valor ganado se puede aplicar a las características de ágil desde la naturaleza iterativa e incremental donde los proyectos ágiles normalmente se dividen en iteraciones más pequeñas y manejables. AgileEVM se puede utilizar para realizar un seguimiento del progreso de cada iteración e identificar cualquier problema desde el principio, desde las métricas simples y fáciles de usar [12].

Las medidas de desempeño que usa el AgileEVM son:

- Total de puntos de historia planificados
- Total de sprints planificados
- El presupuesto previsto para el Sprint
- Número del sprint actual/ Número total de sprints planificados
- Número total de puntos de la historia completados / Número total de puntos de la historia planificados.

Ya después en 2013 se realizó un trabajo donde se hace una investigación de los métodos ágiles para su implantación en un laboratorio de seguridad eléctrica, en donde se propuso un método de control de proyectos que aplicaba EVM en su estado natural midiendo la gestión del tiempo, costo y alcance en un proyecto con características ágiles aplicado a la industria eléctrica, tomando en cuenta las características originales de medición del método de control, solo adaptándolo a este tipo de proyectos [8].

Este documento establece que la necesidad de implementar la gestión del valor ganado en proyectos ágiles está en función de su capacidad de medir costo y tiempo a la vez y poderlos relacionar y determinar el rendimiento del proyecto a lo largo de este. Por otro lado, también destacan que es muy importante EVM en gestión ágil por su parte visual que permite identificar el comportamiento de los indicadores mencionados y mostrarlo a todo el grupo de trabajo en tiempo real [8].

Sobre el 2019 Filip Popović, Tatjana Atanasijević et.al [7] escribieron un documento donde relacionan la gestión del valor ganado en proyectos ágiles, pero más actualizado. Este documento busca implementar un EVM en los enfoques ágiles utilizando solo tres parámetros de planificación básicos: velocidad, trabajo pendiente estimado y costo. Este método busca encontrar de qué manera gestionar y rastrear el costo para evaluar el ROI real del proyecto [7]. El artículo explora varios

enfoques para adaptar EVM al marco ágil, enfatizando la importancia de medir el valor entregado en lugar de solo la finalización de la tarea. En este trabajo se menciona que El verdadero desafío en los proyectos de software gestionados de forma ágil es cómo rastrear y controlar la ejecución del proyecto, cómo monitorear el estado del proyecto y, dependiendo de la condición, realizar medidas correctivas específicas, todo esto debido a que la metodología ágil no define cómo realizar un seguimiento de los costos para evaluar la información del ROI [7].

Sobre el 2022 Jan Avais [5] propone sobre el monitoreo y control del alcance del proyecto de software utilizando EVM ágil, el artículo propone que es importante incorporar EVM con Agile para pronosticar el alcance y que esto ha llevado a que se hayan realizado varios intentos para integrar EVM con Agile en el nivel de iteración y lanzamiento para pronosticar el alcance. El documento propone que la metodología AgileEVM enfrenta los siguientes cuatro desafíos: El primero es No conocer e incorporar los efectos cambiantes de Agile genera objetivos de proyecto poco realistas, el uso de la velocidad como métrica para monitorear y controlar el trabajo es un desafío debido a la naturaleza local de esta métrica; de manera similar, centrarse en el equipo individual y la liberación individual es otro desafío porque contrasta con las implicaciones a gran escala de la EVM tradicional; además, el método de cálculo del "porcentaje completado" a nivel de elemento de trabajo es otro problema porque sin una base objetiva para contar este progreso, las proyecciones a niveles superiores se ponen en duda [5]. El autor en su artículo para abordar estos desafíos, en esta investigación se ha propuesto un enfoque novedoso. El enfoque consta de tres pasos. En primer lugar, se realiza una revisión sistemática de la literatura para identificar los factores que influyen en el cambio de alcance. En segundo lugar, se realiza el mapeo de los factores identificados con diferentes elementos del Índice de Calificación del Alcance del Proyecto de Software Ágil (A-SPSRI). En el paso final se encuentra la cuantificación, integración EVM y simulación del universo de proyectos [5]. Por otro lado, Aun más reciente, en el 2023 Manuel Castañón, Ricardo Rosales et. al [13] desarrollan un modelo de simulación basado en agentes de gestión del valor ganado, donde realizan un planteamiento muy importante para combinar los conceptos ya mencionados [13]. En este artículo, se propone un modelo basado en agentes que describe la gestión de tareas dentro de un proyecto utilizando una evaluación del valor ganado y un tablero de tareas. El modelo ilustra cómo EVM produce un método eficiente para medir el desempeño de un proyecto comparando el progreso real con las actividades planificadas, facilitando así la formulación de estimaciones previstas más precisas. Como prueba de concepto, se aprovecha la implementación para calcular los índices de rendimiento de EVM de acuerdo con una línea base de medición del rendimiento (PMB) en forma de tablero de tareas. El objetivo general del artículo es desarrollar un modelo que aproveche la gestión del valor ganado (EVM) para una gestión eficaz de las tareas del proyecto y la evaluación del desempeño. [13]. Las medidas de desempeño que usa son el tiempo de finalización

del proyecto, costo de operación, programar el desempeño y el rendimiento del alcance. A continuación, se muestra un gráfico que resume las medidas de desempeño que relaciona cada uno de los artículos anteriormente relacionados:

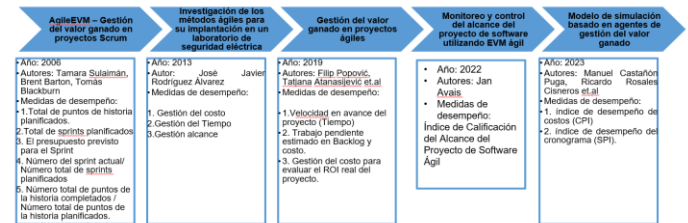


Ilustración 2. Comparativa de Medidas de Desempeño de los métodos de control Revisados. Fuente Propia

Al analizar estos documentos, se evidencia el vacío en el conocimiento mencionado al principio del estudio. Aunque los métodos que buscan integrar y adaptar el EVM a proyectos ágiles utilizan características y variables de estos proyectos en sus medidas de desempeño, siguen manteniendo el enfoque tradicional del EVM, centrado en el seguimiento y control del tiempo, costo y alcance del proyecto. No se enfocan en las medidas de desempeño que generan valor en los enfoques ágiles. El problema radica en la falta de métodos de control para proyectos con metodología Scrum que estén alineados con los principios ágiles. Esta carencia a menudo se traduce en deficiencias durante la fase de control de proyectos, al no otorgar la debida importancia a las medidas de desempeño más relevantes en un entorno ágil.

Por lo tanto, se identifica la necesidad de un método de control de proyectos con metodología Scrum que permita adaptar las medidas de desempeño del EVM a aquellas que generan valor en este tipo de proyectos, según los principios del manifiesto ágil. Esto permitirá que la fase de control de estos proyectos se enfoque en la medición de las variables que realmente agregan valor.

IV. CONCLUSIONES

1. Aunque se han propuesto varios métodos para integrar el método de EVM en proyectos ágiles, estos enfoques siguen centrándose predominantemente en las métricas tradicionales de tiempo, costo y alcance.
2. Existe una carencia de métodos de control específicos para proyectos con metodología Scrum que estén alineados con los principios ágiles. Esta falta de alineación resulta en deficiencias durante la fase de control de proyectos, ya que no se otorga suficiente importancia a las medidas de desempeño más relevantes en un entorno ágil.
3. Se identifica la necesidad de un método de control de proyectos con metodología Scrum que permita adaptar las medidas de desempeño del EVM a aquellas que generan valor en este tipo de proyectos, según los principios del manifiesto ágil y que sean críticas para el éxito de proyectos ágiles.

REFERENCIAS

- [1] H. Kerzner, "Project Management Metrics, KPIs, and Dashboards: A Guide to Measuring and Monitoring Project Performance.," *John Wiley & Sons.*, 2017.
- [2] Ö. Hazir, "Revisión de los modelos analíticos, enfoques y herramientas de apoyo a la toma de decisiones en el seguimiento y control de proyectos," *International Journal of Project Management* , 2014.
- [3] R.L. Wysocki, "Gestión eficaz de proyectos: tradicional, ágil, extrema." *John Wiley e Hijos, Novena Edición*, 2017.
- [4] PMI, "PMBOK® Guide," *Seventh Edition*, 2021.
- [5] J. Avaïs, A. Asad & A.Naveed, "Monitoreo y control del alcance del proyecto de software utilizando EVM ágil.," *En J. Avaïs, A. Asad, & A. Naveed.*, 2022.
- [6] E. Herrea y L. E. Valencia, "Del manifiesto ágil sus valores y principios," *Scientia et Technica Año XIII*, 2007.
- [7] F. Popović, T. Atanasijević y S. Atanasijević, "Gestión del valor ganado en proyectos ágiles,"*Limen* 2019, 2019.
- [8] J. J. Rodríguez Álvarez, "Investigación de los métodos ágiles para su implantación en un laboratorio de seguridad eléctrica," Tesis de grado, Departamento de Organización de Empresas, Universidad politécnica de catalunya, Barcelona, España, 2013.
- [9] M. Cohn, "User stories applied: For agile software development.," *Addison-Wesley Professional*, 2004.
- [10] K. Schwaber, "Agile project management with Scrum.," *Microsoft Press.*, 2004.
- [11] D. Leffingwell, "Agile software requirements: Lean requirements practices for teams, programs, and the enterprise.," *Addison-Wesley Professional.*, 2010.
- [12] T. Sulaimán, B. Barton y T. Blackburn, "AgileEVM – Gestión del valor ganado en proyectos Scrum," *Actas de la Conferencia AGILE 2006*, 2006.
- [13] M. Castañón, R. F. Rosales et al, "Modelo de simulación basado en agentes de gestión del valor ganado," *Sistemas*, 2023.

Functional And Non-Functional Requirements Prioritization Methodologies In Agile Environments: A Review Of The Literature.

Gutierrez, Julian¹, Rueda Feizar²

Abstract—Requirements prioritization is a fundamental phase for the development of software applications in agile environments. The implementation of the right technique can make the difference between project success or failure. Although multiple tools have been developed, it is necessary to determine the fundamental characteristics that make them applicable to different contexts. This review focuses on identifying the key factors in the prioritization of functional and non-functional requirements taking into account that the value or benefit to the customer and the development costs are crucial to the success of the project. The development of the paper selection for this review was guided by 3 basic questions, which are: Does the paper include a description of methods and techniques for prioritizing requirements in software development? Q2. Does the paper develop base concepts for understanding functional and non-functional requirements? Q3. Does the paper addresses the topic from the perspective of agile methodologies?

Index Terms—Agile, Functional and Non-Functional Requirements, Requirements Prioritization, Scrum

I. INTRODUCTION

THE development of agile methodologies has been driven by the dizzying speed with which the environment is changing [1]. Scrum methodology is one of the most accepted by the software development community, in the survey conducted by Digital.ai in 2022 in which 3220 participants were surveyed 87% said they use Scrum as a development methodology [2], among some of the advantages of Scrum are the ease of implementation, the great contact with the customer, its focus on the value of the final product and the extensive knowledge that the community has of their practices and artifacts.

While the Scrum methodology is very flexible, in the field of software requirements there is no specific tool for prioritization, this can make it difficult to select the most appropriate technique according to the context [3]. In addition, the lack of a prioritization tool that considers both functional and non-functional requirements, along with economic factors such as cost and value, can lead to subjective decisions that can result in software deliveries that do not meet customer expectations, delayed deadlines and uncontrolled costs [4]. That is why in this paper a literature review has been carried out to identify the

most important characteristics of each technique and to make a comparison under the criteria of ease of implementation and scalability, inclusion of functional and non-functional requirements, flexibility for reprioritization in changing environments, and evaluation of cost and final value for the customer.

The first phase describes how the bibliometric review was conducted and the selection criteria for each of the papers; in the second part there is a summary and critical comparison of the most commonly used techniques for prioritizing requirements; in the third part, the applicability of each technique is determined based on the selected criteria; and in the last part, the discussion and conclusions of the review are developed.

II. METODOLOGY

The development of this paper focuses on identifying the progress, challenges and opportunities of the prioritization of requirements that will allow laying the foundations for future related research. Therefore, the following questions are defined to guide the process taking into account the objective.

A. Guiding questions for the review

This paper is developed through the search and identification of the publications that answer at least one of the 3 guiding questions of the review, which are:

Q1. Does the paper include a description of methods and techniques for prioritizing requirements in software development?

Q2. Does the paper develop basic concepts for understanding functional and non-functional requirements?

Q3. Does the paper addresses the subject of requirements from the perspective of agile methodologies?

These questions are complemented with the addition of inclusion and exclusion criteria.

B. Inclusion criteria

IC1: Papers must have been peer reviewed journal.

IC2: Papers must be written in English.

IC3: Papers must be no more than 10 years old.

IC4: Papers must be directly related to the prioritization of

¹ Gutierrez Julian was industrial engineer and student of the Master industrial engineering at Universidad Distrital Francisco José De Caldas, research group ARCO-SES. Professor at Corporación Universitaria Iberoamericana. Email: juagutierrezl@udistrital.edu.co, julian.gutierrez@docente.ibero.edu.co - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5967-9060>.

² 2. Industrial engineer of Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Master in Industrial engineering of Universidad Distrital Francisco José de Caldas, PhD of engineering industry and organizations of Universidad Nacional de Colombia, research group: ARCOSES, professor in Universidad Distrital Francisco José de Caldas, e-mail: fjruedav@udistrital.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0109-9204>

requirements.

IC5: The papers must be published in indexed journals.

IC6: The paper is based on the Agile theme for the development of the topics.

C. Exclusion criteria

EC1: The paper has no applicability to requirements prioritization.

EC2: The paper is not written in English

EC3: The paper is not available

Each inclusion criterion is evaluated with the following score: 1 point if it completely meets the inclusion criterion and 0.5 if it partially meets the criterion, 0 points if it does not meet the criterion. Likewise, the exclusion criteria are scored -1 if it completely fails, -0.5 if it partially fails and 0 if it does not fail, this score of the criteria is added for each paper to determine its inclusion or exclusion in the review. The minimum score to include a paper is +2.5. It should be noted that the EC3 criterion is intrinsically exclusionary.

D. Search Strategy

To find the desired papers, a search was performed in the main databases and search engines related to the subject matter that are available online, including Scopus, IEEE Xplore, ACM, Springer, Elsevier, ResearchGate, Science Direct and Google Scholar.

The search was conducted using the following keywords:

- Agile
- Requirements prioritization
- Non-functional requirements
- Scrum prioritization
- Systematic literature review
- Cost-based
- Cost-Value
- Software Development

The main search equations used are:

TITLE-ABS-KEY ((scrum OR agile) AND (prioritization OR "agile prioritization" OR "requirements prioritization" OR cost-based OR "cost-based prioritization" OR cost-value OR non-functional OR (cost-value AND prioritization)) OR "non-functional requirements")

TITLE-ABS-KEY ((scrum OR agile OR review) AND (prioritization OR "agile prioritization" OR "requirements prioritization" OR cost-based OR "cost-based prioritization" OR cost-value OR non-functional OR (cost-value AND prioritization)) OR "non-functional requirements") AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP"))

A first review of the papers was carried out based on the abstracts in which 763 publications were included, of which 63 underwent a more in-depth review. When reviewing the publications, 44 publications were found to be useful to support the development of the conceptual framework of the topic.

III. RESULTS AND FINDINGS

The state of the art is fundamental to understand the gaps in the

different topics related to the following research

A. Agile and Scrum

The development of software projects in changing environments resulted in the formulation of agile methodologies [5] that focus on increasing the value of the final product through close interaction with the customer [6], [7]. Among the Agile methodologies is Scrum which is currently the most widely used [2]. The core of its practices is based on gradual increments that are performed from periods of project development called sprints that usually comprise between 1 and 4 weeks [7], [8]. The mechanics is based on the validation of each increment by customers which generates a difference with traditional methodologies in which the product is usually validated in larger periods or at the end of the project [1], [10], [11].

B. Prioritization of requirements

The importance of prioritizing requirements in software development lies in the limitation of available resources (time and money) to meet the most important customer demands [11], by prioritizing it is possible to determine to eliminate requirements in order to devote resources to more important functionalities [12]. Determining what will be done earlier or later can reduce project management risks and help to focus on increasing the final value at the lowest cost [13]. This process should be quick and simple to ensure that the final product meets the three most relevant factors of quality, low cost and timely delivery [14].

In prioritization the experts have to define the order in which they are going to work on issues such as the time window for each task, the importance or priority of the project problems, the interdependencies of the requirements and the skills of the development team to execute the tasks [13] Prioritization should be carried out taking into account the limitations in software development which may come from the lack of knowledge of the work team, the budget, the technology and the time limit to develop the project [12], [13].

C. Requirements Prioritization Techniques

Throughout the literature review there are different requirements prioritization techniques which have been used empirically by the leaders of development projects [15], among them we find analytic hierarchy process (AHP), Numerical Assignment, Binary Search tree, planning game, Quality Function Deployment, Cumulative Voting, Cost-Value approach, MoSCoW, TopTen, Kano Model among many others [3], [11], [12], [16].

The following methods have been included in the review.

- Analytic Hierarchy Process (AHP) [9], [12], [19], [20], [20], [21], [22], [23].
- Numerical Assignment (NA) [12], [20], [21].
- Binary Search Tree (BST) [12], [16], [24].
- Planning Game (PG) [12], [24].
- Cumulative Voting (CV) [12], [20], [24].
- Quality Functional Deployment (QFD) [12], [16].

- Cost-Value approach [1], [12], [14], [20].
- Win-Win method [12] [25].
- MosCow technique [12], [16], [17].

D. Prioritization of non-functional requirements

Functional and non-functional requirements are fundamental elements in the software development process, which help to define the scope and characteristics of the system to be built [9]. Definitions and differences between both types of requirements are presented below.

- Functional requirements: functional requirements are those that are derived directly from the needs of customers or end users of the software [26]. These requirements refer to the specific actions or behaviors that the system must be able to perform in order to satisfy the user's needs and meet the project objectives. In other words, functional requirements describe what the system should do and how it should behave from the user's perspective [27].
- Non-functional requirements: on the other hand, non-functional requirements refer to aspects that are not directly related to the specific functionalities of the system, but rather to its correct operation and the fulfillment of certain quality characteristics. These requirements establish conditions that the system must meet in terms of performance, security, usability, maintainability, among others [9].

One of the approaches proposed for the prioritization of non-functional requirements is based on the relationship between these requirements and the functional ones. This method involves assessing the impact that non-functional requirements have on the development of functional requirements, which allows generating a prioritization of non-functional requirements through the indirect identification of the importance given to the corresponding functional requirements by the end user [9].

The implementation of this type of relationship facilitates the identification of the hidden relevance of non-functional requirements in the operability of functional requirements, this type of strategy is implemented because in general customers have incomplete or no knowledge of the existence of non-functional requirements. In this way, prioritization methodologies rely on the knowledge of the team developers who are responsible for identifying the link between the two types of requirements [28].

The previous approach is the most used in the literature and is applied in several works by means of tools such as AHP [28] and FAHP [9]. However, it is important to ratify that as shown above the mentioned methodologies are difficult to scale to a large number of requirements, an example of this is shown by Gupta (2017) who using a set of 24 functional and 6 non-functional requirements generated 276 paired comparisons.

E. Classification of non-functional requirements

Throughout the literature, different types of classifications of non-functional requirements have been found, among them are, for example, the classification of requirements by their nature.

On the other hand, non-functional requirements have been classified by means of the forensic findings of investigations that identify important failures in the systems [29].

The following is a brief list of the main non-functional requirements

- Immunity requirements [30].
- Innocuousness requirements [31]
- Availability requirements [32]
- Survivability requirements [33]
- Reliability requirements [34]
- Maintainability requirement [34]
- Modularity requirements [5]
- Interoperability requirements [34].
- Reconfigurability and modifiability requirements [34].
- Extensibility requirements [3].
- Scalability requirements [3], [35], [36].
- Adaptability requirement [34].
- Flexibility requirement [34].

F. Challenges and good practices in the implementation of non-functional requirements

By reviewing the literature it is possible to identify a series of problems found in the clear implementation of non-functional requirements [37], among them are:

- failure to include non-functional requirements in the development
- misunderstandings about non-functional requirements that are expressed as user stories or similar simplified representations.
- lack of recognition of non-functional requirements by stakeholders.
- difficulties in documenting non-functional requirements in a way that clearly shows their dependencies.
- absence of traceability mechanisms for non-functional requirements.
- inadequate specification of tests to verify the implementation of non-functional requirements.
- insufficient knowledge or competence in the project team on advanced concepts of non-functional requirements.
- overlooking sources of non-functional requirements, such as stakeholders.

The review also identifies some best practices for the development of non-functional requirements, including those adopted from templated approaches, and the need to use modified or additional specification techniques for Non-Functional Requirements [37].

- maintain traceability between functional requirements and non-functional requirements.
- start focusing on non-functional requirements early in the project.
- document non-functional requirements using standard enterprise requirements architecture specification techniques, such as user stories, completion definition and

acceptance criteria.

- use automated monitoring tools, such as sonar, to monitor the quality of software under development.
- involve non-functional requirements specialists, such as a team to ensure proper implementation or a stakeholder.
- involve multiple roles and points of view to elicit and/or review non-functional requirements.
- educate and create awareness about the importance of non-functional requirements.
- use a catalog of patterns or templates to specify non-functional requirements.
- use abstract but easy to understand terms to elicit non-functional requirements from stakeholders.

On the other hand, the implementation of non-functional requirements goes beyond the practices developed by the team of programmers and raises the need to better understand the non-functional requirements from the users' perspective, since the identification of the context is key to understand the requirements. The authors identify the domains of development from the customers' perspective as follows:

- Corporate values
- Laws and regulations
- User needs and expectations
- Contextual aspects
- Business constraints

IV. CONCLUSION

The prioritization of requirements has focused mainly on the implementation of functional requirements because this is the conceptual basis of agile methodologies such as scrum. However, due to the awareness of software development teams about the importance of non-functional requirements has led the research to develop in the direction of the inclusion of functional and non-functional requirements together, although the management of non-functional requirements implies a greater difficulty in comparison of the same activity with functional requirements.

The growing trend of implementing non-functional requirements generates a search for the development of prioritization techniques that symbiotically include all types of requirements in order to reduce cost and increase stakeholder benefit.

V. REFERENCES

- [1] N. H. Borhan, H. Zulzalil, S. Hassan, N. Hayati, and A. L. I. Mohd, "Requirements Prioritization in Agile Projects: From Experts' Perspectives," *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, vol. 100, no. 19, pp. 5710–5723, 2022.
- [2] Digital.ai, "State of Agile Report Contents," 2022.
- [3] F. A. Bukhsh, Z. A. Bukhsh, and M. Daneva, "A systematic literature review on requirement prioritization techniques and their empirical evaluation," *Comput. Stand. Interfaces*, vol. 69, no. November 2019, p. 103389, 2020, doi: 10.1016/j.csi.2019.103389.
- [4] A. Muhammad, A. Siddique, M. Mubasher, A. Aldweesh, and Q. N. Naveed, "Prioritizing Non-Functional Requirements in Agile Process Using Multi Criteria Decision Making Analysis," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 24631–24654, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3253771.
- [5] S. Tomke and D. Reinertsen, "Agile Product Development: Managing Development Flexibility in Uncertain Environments," vol. 41, no. I, 1998.
- [6] H. Elshandidy and S. Mazen, "Agile and Traditional Requirements Engineering: A Survey," no. September 2013, 2014, doi: 10.14299/ijser.2013.09.002.
- [7] K. Schwaber and J. Sutherland, "2020-Scrum-Guide-Spanish-Latin-South-American," *Scrum.Org and ScrumInc*, p. 16, 2020, [Online]. Available: <https://scrumguides.org/docs/scrumguide/v2020/2020-Scrum-Guide-Spanish-Latin-South-American.pdf>
- [8] D. ; Vacanti and Y. Yeret, "La Guía Kanban para Scrum Teams," 2021, [Online]. Available: <https://scrumorg-website-prod.s3.amazonaws.com/drupal/2021-03/2021-Kanban-Guide-Spanish-European.pdf?nexus-file=https%3A%2F%2Fscrumorg-website-prod.s3.amazonaws.com%2Fdrupal%2F2021-03%2F2021-Kanban-Guide-Spanish-European.pdf>
- [9] N. Hazlini Borhan, H. Zulzalil, S. Hassan, and N. Mohd Ali, "A Prioritization Approach Upon Non-Functional and Functional UserStories in Agile-Scrum Software Development (i-USPA): APreliminary Results," *Int. J. Multidiscip. Sci. Adv. Technol.*, vol. 2, no. 6, pp. 62–76, 2021, [Online]. Available: <http://www.ijmsat.com>
- [10] V. T. Heikkil, "A Mapping Study on Requirements Engineering in Agile Software Development," 2015, doi: 10.1109/SEAA.2015.70.
- [11] Z. Hoy and M. Xu, "Agile Software Requirements Engineering Challenges-Solutions—A Conceptual Framework from Systematic Literature Review," *Inf.*, vol. 14, no. 6, 2023, doi: 10.3390/info14060322.
- [12] R. Shaik, "Towards Understanding How Human Aspects Affect Requirements Prioritization," no. October, 2022, [Online]. Available: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:bth-24082>
- [13] K. Abdelazim, R. Moawad, and E. Elfakharany, "A Framework for Requirements Prioritization Process in Agile Software Development," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1454, no. 1, pp. 0–11, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1454/1/012001.
- [14] J. Karlsson and K. Ryan, "A cost-value approach for prioritizing requirements," *IEEE Softw.*, vol. 14, no. 5, pp. 67–74, 1997, doi: 10.1109/52.605933.
- [15] Y. Bugayenko et al., *Prioritizing tasks in software development: A systematic literature review*, vol. 18, no. 4 April. 2023. doi: 10.1371/journal.pone.0283838.
- [16] Z. Racheva, M. Daneva, and L. Buglione, "Supporting the dynamic reprioritization of requirements in agile development of software products," *2008 2nd Int. Work. Softw. Prod. Manag. ISWPM'08*, no. December, pp. 49–57, 2008, doi: 10.1109/IWSPM.2008.7.
- [17] Ahmad, Rizawanti, Woodings, and Jalil, "MCBRank Method to Improve Software Requirements

- Prioritization An Empirical Investigation,” *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 13, no. 7, pp. 215–222, 2022.
- [18] I. Olaronke, I. Rhoda, and G. Ishaya, “An Appraisal of Software Requirement Prioritization Techniques,” *Asian J. Res. Comput. Sci.*, no. April, pp. 1–16, 2018, doi: 10.9734/ajrcos/2018/v1i124717.
- [19] N. H. Borhan, H. Zulzalil, S. Hassan, and N. M. Ali, “A Hybrid Prioritization Approach by integrating non-Functional and Functional User Stories in Agile-Scrum Software Development (i-USPA):A preliminary study,” in *2022 IEEE International Conference on Computing, ICOCO 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 276–282. doi: 10.1109/ICOCO56118.2022.10031863.
- [20] J. C. B. Somohano-Murrieta, J. O. Ocharan-Hernandez, A. J. Sanchez-Garcia, and M. De Los Angeles Arenas-Valdes, “Requirements prioritization techniques in the last decade: A systematic literature review,” *Proc. - 2020 8th Ed. Int. Conf. Softw. Eng. Res. Innov. CONISOFT 2020*, pp. 11–20, 2020, doi: 10.1109/CONISOFT50191.2020.00013.
- [21] J. Karlsson, “Software requirements prioritizing,” *Proc. IEEE Int. Conf. Requir. Eng.*, pp. 110–116, 1996, doi: 10.1109/icre.1996.491435.
- [22] N. H. Borhan, H. Zulzalil, S. Hassan, and N. M. Ali, “Requirements prioritization techniques focusing on agile software development: A systematic literature review,” *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 8, no. 11, pp. 2118–2125, 2019.
- [23] T. Amelia and R. B. Mohamed, “A Proposed Requirements Prioritization Model Based on Cost-Value Approach with Collaboration Perspective,” *Proc. - 2021 Int. Conf. Softw. Eng. Comput. Syst. 4th Int. Conf. Comput. Sci. Inf. Manag. ICSECS-ICOCOSIM 2021*, pp. 10–15, 2021, doi: 10.1109/ICSECS52883.2021.00009.
- [24] Khan, I. Ur Rehman, Y. Hayat Khan, I. Javed Khan, and S. Rashid, “Comparison of Requirement Prioritization Techniques to Find Best Prioritization Technique,” *Int. J. Mod. Educ. Comput. Sci.*, vol. 7, no. 11, pp. 53–59, 2015, doi: 10.5815/ijmecs.2015.11.06.
- [25] N. Mead, “Requirements Prioritization Introduction,” no. September, 2006.
- [26] K. Ignaim, S. M. Al Khatib, K. Alkharabsheh, and J. M. Fernandes, “Approach To Attributed Feature Modeling for Requirements Elicitation in Scrum Agile Development,” *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, vol. 101, no. 9, pp. 3338–3350, 2023.
- [27] Y. Gazi and M. Sadiq, “Prioritization of NFRs using Multi-Criteria Decision Making Methods,” 2015.
- [28] V. Gupta, S. Lohia, D. Çetinkaya, and H.-J. Kim, “Non-functional Requirement Prioritization Approach,” 2017.
- [29] K. I. Gómez Sotelo, C. Baron, P. Esteban, C. Y. A. G. Estrada, and L. de J. Laredo Velázquez, “How to find non-functional requirements in system developments,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 1573–1578, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.272.
- [30] M. Ali Naqvi, M. Astekin, S. Malik, and L. Moonen, “Adaptive Immunity for Software: Towards Autonomous Self-healing Systems,” *Proc. - 2021 IEEE Int. Conf. Softw. Anal. Evol. Reengineering, SANER 2021*, no. Section III, pp. 521–525, 2021, doi: 10.1109/SANER50967.2021.00058.
- [31] D. Cofer, “Unintended Behavior in Learning-Enabled Systems: Detecting the Unknown Unknowns,” *AIAA/IEEE Digit. Avion. Syst. Conf. - Proc.*, vol. 2021-October, 2021, doi: 10.1109/DASC52595.2021.9594406.
- [32] K. Ahmad, M. Abdelrazek, C. Arora, M. Bano, and J. Grundy, “Requirements engineering for artificial intelligence systems: A systematic mapping study,” *Inf. Softw. Technol.*, vol. 158, no. January, p. 107176, 2023, doi: 10.1016/j.infsof.2023.107176.
- [33] K. Martínez and D. Claudio, “Expanding Fundamental Boundaries between Resilience and Survivability in Systems Engineering: A Literature Review,” *Sustain.*, vol. 15, no. 6, 2023, doi: 10.3390/su15064811.
- [34] M. Ahmed, S. U. R. Khan, and K. A. Alam, “An NLP-based quality attributes extraction and prioritization framework in Agile-driven software development,” *Autom. Softw. Eng.*, vol. 30, no. 1, 2023, doi: 10.1007/s10515-022-00371-9.
- [35] P. Kandil, S. Moussa, and N. Badr, “Cluster-based test cases prioritization and selection technique for agile regression testing,” in *Journal of Software: Evolution and Process*, John Wiley and Sons Ltd, 2017. doi: 10.1002/smr.1794.
- [36] K. B. Ijaz, I. Inayat, and F. Allah Bukhsh, “Non-functional Requirements Prioritization: A Systematic Literature Review,” *Proc. - 45th Euromicro Conf. Softw. Eng. Adv. Appl. SEAA 2019*, pp. 379–386, 2019, doi: 10.1109/SEAA.2019.00064.
- [37] A. Jarzębowicz and P. Weichbroth, “A Systematic Literature Review on Implementing Non-functional Requirements in Agile Software Development: Issues and Facilitating Practices,” *Lect. Notes Bus. Inf. Process.*, vol. 408, pp. 91–110, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-67084-9_6.

Toma de Decisiones en Programación de Proyectos de Construcción Implementando Programación Dinámica y Metodologías Ágiles: una Revisión de la Literatura

Luisa Fernanda Hernández Corredor¹; Eduyn R. Lopez Santana²

Resumen— El campo de la construcción ha experimentado una evolución notable en su gestión y desarrollo de proyectos, buscando constantemente optimizar procesos y tiempos para garantizar la eficiencia y calidad en sus ejecuciones. En este contexto, la implementación de un modelo híbrido, fusionando la Programación Dinámica y las Metodologías Ágiles, emerge como una estrategia innovadora para afrontar los desafíos inherentes a esta industria. Este enfoque ofrece una combinación poderosa al unir la capacidad analítica y predictiva de la Programación Dinámica [1] con la flexibilidad, adaptabilidad y enfoque colaborativo de las Metodologías Ágiles. Esta sinergia se plantea como un catalizador para la optimización de procesos de planificación, asignación de recursos y gestión de riesgos, promoviendo así una ejecución más eficiente y exitosa de proyectos constructivos.

Palabras Claves Programación Dinámica, Metodologías ágiles, Gestión de Proyectos, Modelos Híbridos – Hybrid models, Planificación, Eficiencia en Proyectos

Abstract The construction field has undergone significant evolution in project management and development, constantly seeking to optimize processes and timelines to ensure efficiency and quality. In this context, implementing a hybrid model that combines Dynamic Programming and Agile Methodologies emerges as an innovative strategy to address the inherent challenges of this industry. This approach offers a powerful combination by integrating the analytical and predictive capabilities of Dynamic Programming [1] with the flexibility, adaptability, and collaborative focus of Agile Methodologies. This synergy is proposed as a catalyst for optimizing planning processes, resource allocation, and risk management, promoting more efficient and successful execution of construction projects.

Keywords — Dynamic programming, Agile methodologies, Project management, Hybrid models, Planning, Project efficiency

INTRODUCCIÓN

La Programación Dinámica se posiciona como una técnica matemática de inmenso valor en la toma de decisiones secuenciales interrelacionadas [1]. Esta metodología sobresale

por su capacidad para proporcionar un enfoque sistemático en la determinación de la combinación óptima de decisiones en contextos específicos, presentándose como un método general para resolver una amplia gama de problemas. A diferencia de la programación lineal, la programación dinámica no se sujeta a una formulación matemática estándar, requiriendo ajustes a las ecuaciones según la situación particular en consideración. Esta flexibilidad demanda creatividad y un sólido conocimiento de la estructura general de los problemas para identificar cuándo y cómo aplicar esta técnica.

Paralelamente, las Metodologías Ágiles representan enfoques de gestión de proyectos basados en incrementos evolutivos y flujos de trabajo continuos [2]. Estas metodologías, como Kanban y Scrum, han emergido como alternativas a los métodos tradicionales, caracterizados por su rigidez y necesidad de una planificación exhaustiva previa a la ejecución [3]. Enfocadas en la adaptabilidad, la colaboración y la comunicación efectiva, las metodologías ágiles han demostrado ser valiosas herramientas en la gestión de proyectos de construcción.

Este estudio se enfoca en explorar y analizar la intersección entre la Programación Dinámica y las Metodologías Ágiles en el contexto específico de la gestión de proyectos de construcción. A través de un análisis exhaustivo de la literatura disponible, se busca comprender cómo estas dos metodologías se complementan y se potencian mutuamente en la optimización de la planificación, ejecución y control de proyectos en el sector de la construcción. Este análisis detallado de las aplicaciones y sinergias entre la programación dinámica y las metodologías ágiles sienta las bases para comprender su integración y potencialidad en entornos dinámicos como la gestión de proyectos de construcción.

I. PROGRAMACIÓN DINÁMICA Y METODOLOGÍAS ÁGILES APLICADOS A LA GESTIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

Los proyectos de construcción son proyectos complejos que se llevan a cabo en entornos dinámicos, lo que requiere tener en cuenta diferentes incertidumbres durante la etapa de planificación. Existe una falta significativa de herramientas de gestión para proyectos repetitivos que tengan en cuenta las incertidumbres en el entorno de la construcción. [4]. A pesar de los avances tecnológicos en la construcción, se sigue gestionando proyectos de manera tradicional, en

¹ Ingeniera Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Grupo de Investigación: ARCOSES, Líder de Productividad CONSTRUCTORA BOLIVAR SASS, Correo Electrónico: lfhernandezc@udistrital.edu.co

² Eduyn R. López-Santana Profesor Asistente de Ingeniería Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Doctorado en Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Maestría en Ingeniería Industrial, Universidad de los Andes, Ingeniería Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Calda, Correo Electrónico: erlopezs@udistrital.edu.co

un ciclo de vida predictivo. Sin embargo, a pesar de tener técnicas y materiales definidos, la construcción se enfrenta a constantes desafíos como retrasos en el cronograma, sobrecostos y problemas de calidad. [5].

Aquí es donde la programación dinámica emerge como una herramienta poderosa. A diferencia de enfoques estáticos como la programación lineal, la programación dinámica abarca un conjunto de técnicas matemáticas y algorítmicas que permiten tomar decisiones secuenciales en entornos interrelacionados y complejos.

En el contexto específico de la construcción, donde la incertidumbre y la variabilidad son comunes, la programación dinámica ofrece la flexibilidad necesaria para abordar situaciones cambiantes [6].

Por otro lado, las metodologías ágiles han revolucionado la gestión de proyectos, originalmente aplicadas en el desarrollo de software. Estos enfoques se caracterizan por su adaptabilidad, colaboración y entrega incremental de valor [7].

Si bien se originaron en un contexto diferente, las metodologías ágiles han mostrado una notable eficacia en la industria de la construcción, particularmente en proyectos que demandan flexibilidad, rapidez de respuesta y adaptación a cambios en condiciones y requerimientos [8].

La integración de metodologías ágiles en la gestión de proyectos de construcción puede ofrecer ventajas significativas. Estos métodos permiten ciclos de trabajo más cortos y adaptativos, mejorando la capacidad de respuesta a cambios y reduciendo riesgos potenciales [7].

II. REVISIÓN DE LITERATURA

En esta sección se describe la revisión exhaustiva de la literatura llevada a cabo para el proyecto que busca crear un modelo híbrido para la programación de proyectos de construcción implementado programación dinámica y metodologías ágiles.

Esta revisión se alinea con la búsqueda inicial del problema de investigación y se enfoca específicamente en el caso de estudio planteado.

A. Revisión de literatura en Scopus

La industria de la construcción se destaca por su preferencia hacia metodologías de gestión de proyectos en cascada, lo que conlleva a la ejecución lineal de sus procesos, limitando así la capacidad de retroalimentación en su desarrollo. [10]

La gestión de proyectos en construcción enfrenta el desafío de coordinar diversas actividades para cumplir con los plazos establecidos. Para abordar esto, se recurre a herramientas como el método PERT-CPM, que permite planificar el proyecto.

Estas técnicas gráficas representan todas las operaciones del proyecto y las relacionan para coordinarlas según las necesidades tecnológicas, lo que facilita la optimización del tiempo y recursos en la construcción. [11]

El retraso es un problema bastante común en los proyectos de construcción. La práctica actual de gestión de la construcción suele basarse en la evaluación de retrasos, responsabilidades y reclamaciones. Sin embargo, este enfoque no sirve para eliminar las causas subyacentes de los problemas de retraso.

Además de la estimación de los retrasos, se necesita un método sistemático que evite retrasos en los proyectos [12].

TABLE I
CLASIFICACIÓN GENERAL GESTIÓN PROYECTOS EN CONSTRUCCIÓN

AÑO	AUTOR	Mét. Tradicionales	Metodologías Ágiles	Mét. Optimización	Heurísticas	Otros
2008	Hegazy, T., Kamarah, E.				X	
2009	Castro-Lacouture, D., Suer, Georgia, González Joaquí, J., Yates, J.K.			X	X	
2009	Kim, J.-L., Ellis Jr., RD				X	
2011	Liao, TW, Egbelu, P.J., Sarker, BR, Leu, SS				X	
2012	Chen, S.-M., Griffis, FH, Chen, P.-H., Chang, L.-M.					X
2011	junio, DH, El-Rayes, K.			X	X	
2016	Bakry, I., Moselhi, O., Zayed, T.				X	
2018	Liu, J., Lu, M.			X		
2009	Ali, MM, Elazouni, A.	X				
1993	Mosela, Osama	X				
1988	Russell, AD, Caselton, EE.UU.				X	
1986	Handa, VK, Barcia, RM				X	
2003	Dawood, N., Sriprasert, E., Mallasi, Z.		X		X	
2017	Erol, H., Dikmen, I., Birgonul, Montana, EE.UU.	X	X			
2023	Hijo, PVH, Khoi, LNQ			X		X
2023	Yang, J, Yin, S.			X	X	
2023	Pham, Vu Hong Son	X				
2023	Mar., Xu, J., Zhang, Y.			X	X	
2023	Wu, Z., Mamá, g.				X	

III. DESCRIPCIÓN REVISIÓN DE LITERATURA

La gestión de proyectos se define como la aplicación de herramientas gerenciales para coordinar actividades y recursos con el objetivo de cumplir con los requisitos del proyecto en términos de tiempo, costo y calidad, siendo esencial en el entorno empresarial actual. Implica planificar, organizar, dirigir y controlar las diversas etapas de un proyecto para alcanzar los objetivos establecidos de manera eficiente y efectiva. La dinámica de los proyectos, representada en la Figura 1, refleja la interacción entre los procesos de ejecución, planificación, seguimiento y control, adoptando la idea del ciclo de mejora continua de Shewhart y Deming. Además de los procesos tradicionales del ciclo PDCA, los proyectos incorporan procesos específicos de inicio y cierre.

En la industria de la construcción, prevalece la preferencia por metodologías de gestión de proyectos en cascada, lo que implica la ejecución lineal de sus procesos y limita la capacidad de retroalimentación en su desarrollo. En este contexto, la gestión de proyectos en construcción enfrenta el desafío de coordinar diversas actividades para cumplir con los plazos establecidos.

A. Consideraciones sobre métodos de optimización para la gestión de proyectos de construcción

Los métodos de optimización son fundamentales en la gestión de proyectos de construcción para maximizar la eficiencia operativa y minimizar los costos y tiempos de ejecución. Al modelar las complejas interacciones entre actividades, recursos y restricciones, estos métodos proporcionan herramientas poderosas para la toma de decisiones informadas y la búsqueda de soluciones óptimas en entornos dinámicos.

En particular, el método de programación lineal (LSM) ha sido objeto de numerosos estudios académicos, aunque la investigación sobre su aplicación en escenarios prácticos, como la construcción inversa y demandas flexibles de actividad-sección-asignación de tripulación, sigue siendo limitada. [15].

Además, se destaca la importancia de las metaheurísticas, especialmente en situaciones donde el óptimo global es desconocido o computacionalmente costoso de obtener, proporcionando soluciones aproximadas adecuadas para la toma de decisiones efectivas en proyectos de construcción. [16].

1) Consideraciones sobre la programación dinámica

La programación dinámica se presenta como una valiosa herramienta para abordar decisiones secuenciales en contextos interrelacionados, ofreciendo un método sistemático para determinar la mejor combinación de decisiones en situaciones específicas [1]. A diferencia de la programación lineal, no sigue una formulación matemática estándar, adaptándose a cada problema particular. En el ámbito de la construcción, donde los proyectos se dividen en múltiples etapas, la programación dinámica se ajusta naturalmente a esta estructura, convirtiéndose en una herramienta efectiva para la gestión de proyectos.

Su capacidad para encontrar políticas de decisión óptimas para todo el proyecto es crucial, proporcionando una guía completa para la toma de decisiones en cada etapa y estado posible del proyecto [17].

Por otro lado, la programación dinámica estocástica (SDP) agiliza el proceso de resolución al descomponer el problema en subproblemas manejables que están secuencialmente vinculados [18]

En cuanto a investigaciones alusivas para la gestión de proyectos en construcción encontramos una donde se presenta una formulación de programación dinámica de N etapas y dos variables de estado del problema de programación lineal. Las variables de estado son vectores. Para cualquier actividad, la primera variable de estado representa un conjunto de posibles duraciones necesarias para completar el trabajo en cada una de las ubicaciones. Del mismo modo, para cualquier actividad, la segunda variable de estado representa un conjunto de posibles duraciones de interrupción entre trabajos realizados en ubicaciones adyacentes. Se consideran opciones de duración de la actividad y vectores de duración de la interrupción para cada una de las actividades involucradas en un proyecto.

El problema se formula dentro de un marco de programación dinámica convencional con el objetivo de minimizar la duración general del proyecto. La metodología tiene en cuenta varias de las realidades de la construcción repetitiva, incluidas las relaciones de precedencia generalizadas y la capacidad de tratar una variedad de limitaciones de continuidad del trabajo.

Además, se describe un procedimiento de análisis de sensibilidad que permite la identificación de soluciones casi óptimas, proporcionando al usuario alternativas de cronograma que podrían adaptarse mejor a criterios adicionales no cuantificables [6].

La característica más distintiva de la programación dinámica es su capacidad para encontrar políticas de decisión óptimas para todo el proyecto. Esto significa que ofrece una receta integral para la toma de decisiones en cada etapa y en todos los estados posibles del proyecto de construcción. Esta característica es fundamental en la gestión de proyectos de construcción, ya que se busca optimizar el proceso en su conjunto y no solo en etapas aisladas [6].

B. Consideraciones sobre metodologías ágiles en construcción

Las metodologías ágiles son enfoques de gestión que revolucionan la ejecución de proyectos mediante incrementos evolutivos y flujos de trabajo continuos, respaldados por técnicas visuales como Kanban y Scrum, que proporcionan una visión clara y en tiempo real del progreso de las tareas [7]. Representando una alternativa flexible a los métodos tradicionales, las metodologías ágiles se centran en la adaptabilidad, la colaboración y la comunicación efectiva, lo que las convierte en herramientas valiosas en la gestión de proyectos de construcción [3]

En la industria de la construcción, se han identificado falencias significativas debido a la falta de conocimiento sobre metodologías adecuadas para el control y seguimiento de proyectos, resaltando así la necesidad de implementar enfoques más efectivos [19].

Observando un creciente interés por parte de las organizaciones empresariales en la implementación de técnicas y herramientas de planificación y control de obras basadas en estándares internacionales, como metodologías ágiles, con el objetivo de asegurar el éxito y la eficiencia de los proyectos de construcción a través de una gestión efectiva [20].

1) Elementos teóricos sobre Lean aplicado a la construcción

El término "lean" surge en Japón a finales de los años 50 y principios de los 60, como resultado de investigaciones realizadas por ingenieros de Toyota Motor Corporation para mejorar su línea de producción. Pioneros como Taiichi Ohno buscaban eliminar desperdicios y mejorar

los tiempos de entrega cambiando de la producción en masa a la producción según la demanda del cliente. Esto dio lugar a la "producción lean" o "producción sin pérdidas", que minimiza las pérdidas [21].

Una metodología ágil para la construcción es "Lean Construction", desarrollada por Lauri Koskela en 1992, basada en el modelo de producción Lean de la industria automotriz [22].

Koskela argumenta que la construcción debe ser vista como un proceso de flujo y generación de valor, buscando optimizar o eliminar los flujos para mejorar los tiempos de entrega y añadir valor al proceso. El Lean Construction se enfoca en reducir o eliminar actividades que no agregan valor al proyecto y optimizar aquellas que sí lo hacen, creando un sistema de producción eficiente que minimiza los desperdicios [23].

La perspectiva de Koskela y Ballard cuestiona la efectividad de las pautas del PMI en proyectos de construcción altamente inciertos, argumentando que las técnicas recomendadas carecen de base teórica sólida y métodos adecuados para la planificación. [24].

Mientras el PMI se enfoca en la planificación, presta poca atención al control y la ejecución del proyecto. En contraposición, la filosofía Lean Construction (LC) considera que la planificación y el control son complementarios y dinámicos, estableciendo criterios y estrategias para alcanzar objetivos, y garantizando la secuencia prevista de eventos [25].

Para mejorar la eficiencia en la construcción, Ballard y Howell desarrollaron el Sistema del Último Planificador (LPS), que replantea el enfoque tradicional de planificación para evitar retrasos en la ejecución. Este enfoque se centra en determinar qué actividades pueden realizarse realmente, reduciendo la incertidumbre y evitando retrasos. Categoriza las tareas en "deben hacerse", "pueden hacerse" y "se llevarán a cabo", estableciendo diferentes niveles de planificación [26].

La implementación de LPS facilita el control de la ejecución de actividades en proyectos de construcción, evitando retrasos y pérdidas económicas al garantizar que lo planificado se lleve a cabo [27].

Promover una cultura de mejora continua es fundamental para aplicar los principios de Lean Construction, que incluyen aumentar el valor del producto, reducir la variabilidad y mejorar continuamente el proceso. Sin embargo, las prácticas lean carecen de un procedimiento formal de análisis de retrasos debido a su adversidad a los métodos de la ruta crítica. [12]

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La revisión de literatura resalta la relevancia de la programación dinámica como una técnica matemática invaluable en la gestión de proyectos de construcción. A diferencia de enfoques más tradicionales como la programación lineal, la programación dinámica ofrece un procedimiento sistemático para determinar la combinación óptima de decisiones en un contexto específico, considerando la evolución del sistema a lo largo del tiempo.

La programación dinámica se adapta naturalmente a la estructura por etapas de los proyectos de construcción, lo que la convierte en una herramienta valiosa para gestionar la incertidumbre y la complejidad inherentes a estos proyectos. Al centrarse en la optimización continua y la toma de decisiones basada en datos, la programación dinámica ofrece una forma efectiva de mejorar la eficiencia operativa y minimizar los tiempos de ejecución en proyectos de construcción.

Sin embargo, a pesar de sus ventajas, la implementación exitosa de la programación dinámica en proyectos de construcción requiere una comprensión sólida de los principios subyacentes y la capacidad de modelar adecuadamente las complejas interacciones entre actividades, recursos y restricciones.

Además, es necesario desarrollar herramientas y técnicas específicas para adaptar la programación dinámica a las necesidades y desafíos únicos de la industria de la construcción.

La revisión de literatura también revela un contraste significativo entre las metodologías tradicionales de gestión de proyectos, como las delineadas por el Project Management Institute (PMI), y enfoques más contemporáneos, como Lean Construction (LC). Mientras que las técnicas del PMI se centran en la planificación y prestan poca atención al control y la ejecución, LC reconoce la importancia de ambos aspectos y propone una filosofía que busca eliminar desperdicios y optimizar los flujos de trabajo en proyectos de construcción.

La implementación de herramientas como el Sistema del Último Planificador (LPS) proporciona una alternativa efectiva al enfoque tradicional de planificación, permitiendo una ejecución más eficiente de las actividades. Sin embargo, se observa una falta de formalización en el análisis de retrasos dentro de las prácticas lean, lo que puede representar un desafío para aquellos que buscan integrar este enfoque en sus proyectos.

La revisión de literatura destaca la necesidad de reevaluar las prácticas de gestión de proyectos en la industria de la construcción, especialmente en proyectos caracterizados por alta incertidumbre y complejidad. Si bien las metodologías tradicionales han sido ampliamente adoptadas, enfoques más contemporáneos como Lean Construction ofrecen una perspectiva innovadora para abordar los desafíos inherentes a la ejecución de proyectos de construcción.

La programación dinámica también emerge como una técnica poderosa para mejorar la gestión de proyectos de construcción, ofreciendo un enfoque sistemático y adaptable para optimizar la planificación, ejecución y control de actividades, entendiendo como oportunidad de investigación la programación dinámica estocástica. Si bien su implementación presenta desafíos, especialmente en términos de modelado y adaptación a contextos específicos, el potencial de la programación dinámica para mejorar la eficiencia y la efectividad en la ejecución de proyectos de construcción es innegable. Se necesita una mayor investigación y desarrollo para aprovechar plenamente los beneficios de la programación dinámica en el contexto de la construcción y para abordar las limitaciones actuales en su aplicación práctica.

La implementación exitosa de Lean Construction requiere un cambio cultural y una comprensión sólida de los principios subyacentes. La promoción de una cultura de mejora continua y la integración de herramientas como LPS pueden contribuir significativamente a mejorar la eficiencia y la efectividad en la gestión de proyectos de construcción. Sin embargo, se necesita más investigación y desarrollo para abordar las limitaciones actuales, como la falta de un método formal de análisis de retrasos en las prácticas lean.

La convergencia entre Lean Construction y la Programación Dinámica representa una oportunidad prometedora para abordar los desafíos complejos y dinámicos que enfrenta la industria de la construcción. Al combinar los principios de Lean, centrados en la eliminación de desperdicios y la optimización de procesos, con la capacidad de la Programación Dinámica para modelar y optimizar la ejecución de proyectos a lo largo del tiempo, se puede lograr una gestión más eficiente y efectiva de proyectos de construcción.

Un modelo híbrido entre Lean Construction y Programación Dinámica tiene el potencial de ofrecer beneficios significativos, como la reducción de los tiempos de ejecución, la optimización de recursos, la mejora de la calidad y la minimización de costos.

Al integrar los principios lean en el proceso de planificación y control de proyectos, se puede identificar y eliminar actividades que no agregan valor, reduciendo así el desperdicio y mejorando la productividad.

Además, la Programación Dinámica proporciona una estructura sólida para gestionar la incertidumbre y la variabilidad inherentes a los proyectos de construcción, permitiendo una adaptación continua y una toma de decisiones informada en tiempo real. Al combinar estas dos metodologías, se puede lograr una gestión más ágil y flexible de proyectos de construcción, que se ajuste mejor a las demandas cambiantes del mercado y a las necesidades de los clientes.

En conclusión, el análisis y la implementación de un modelo híbrido entre Lean Construction y Programación Dinámica ofrecen una perspectiva innovadora y prometedora para mejorar la eficiencia, la calidad y la rentabilidad en la industria de la construcción. Este enfoque integrado tiene el potencial de transformar la forma en que se planifican, ejecutan y controlan los proyectos de construcción, proporcionando una base sólida para el éxito a largo plazo en un mercado cada vez más competitivo y dinámico.

REFERENCIAS

- [1] J. Bazaraa, "Programación lineal y flujo de redes". Ed Limusa–Noriega editores. 1994
- [2] M. A.; Marhani, A.; Jaapar, N. A. A.; Bari. "Lean Construction: Towards enhancing sustainable construction in Malaysia." *Procedia-Social and Behavioral Science*, 2012
- [3] E., Gómez Gutiérrez, M. M., Marcillo Guevara, & N., Ramírez López, "Metodologías ágiles para el desarrollo de proyectos", 2021
- [4] I., Bakry, O., Moselhi, & T., Zayed. "Optimized scheduling and buffering of repetitive construction projects under uncertainty". *Engineering, Construction and Architectural Management*, 23(6), 782-800., 2016
- [5] S., Ruiz Bartolomé. "Gestión de proyecto ágil mediante modelo híbrido de construcción", 2022
- [6] A. D., Russell, & W. F., Caselton. "Extensions to linear scheduling optimization". *Journal of Construction Engineering and Management*, 114(1), 36-52, 1988
- [7] M. H. , Mamani Perez. "Aplicación de la línea de balance para la optimización del método de la ruta crítica en la construcción de las tiendas Tambo+ Surco-Lima", 2018.
- [8] E., Gómez Gutiérrez, M. M., Marcillo Guevara, & N., Ramírez López. "Metodologías ágiles para el desarrollo de proyectos", 2021
- [9] J. L., Avedaño Rivera, & H. H., Huaman Fernández. "Control de costos en edificaciones aplicando herramienta de gestión de Proyectos", 2021
- [10] G., Garcés, & C., Peña. "Una revisión sobre Lean Construction para la Gestión de Proyectos de Construcción". *Revista ingeniería de construcción*, 38(1), 43-60, 2023
- [11] E. Pereira Calv. "PERT-CPM", 2014
- [12] H. H., EROL, İ., Dikmen Toker, & M. T. , Birgönül. "A construction delay analysis approach based on Lean principles", 2017
- [13] M. M., Ali, & A., Elazouni. "Finance-based CPM/LOB scheduling of projects with repetitive non-serial activities". *Construction management and economics*, 27(9), 839-856, 2009
- [14] J. L., Kim, & Jr, R. D Ellis. "A framework for integrating elitist GA and project management tool". In *Construction Research Congress 2009: Building a Sustainable Future* (pp. 1096-1104)., 2009
- [15] Z., Yu, C., Wang, Y., Zhao, Z., Hu, & Y., Tang. "Linear Project-Scheduling Optimization Considering a Reverse Construction Scenario". *Applied Sciences*, 13(16), 9407, 2023
- [16] T. W., Liao, P. J., Egbelu, B. R., Sarker, & S. S., Leu. "Metaheuristics for project and construction management" –A state-of-the-art review. *Automation in construction*, 20(5), 491-505, 2011.
- [17] A., Sunyer Torrents, J. B., Fonollosa Guardiet, V., Fernández Alarcón, & J. M., Sallán Leyes. "Programación lineal: métodos cuantitativos para la toma de decisiones", 2016
- [18] S., Yakowitz. "Dynamic programming applications in water resources". *Water resources research*, 18(4), 673-696, 1982.
- [19] Y., AGUALIMPIA VERA, & Y. C., ZAPATA LÓPEZ. "METODOLOGÍAS Y ESTÁNDARES UTILIZADOS EN LA GERENCIA DE PROYECTOS", 2022
- [20] J. A., Caro Ortega, & C. E., Guerrero Herrera. "Estrategias para la optimización del control de costos en proyectos de construcción con base en la aplicación de la metodología del Project Management Institute"–PMI, 2022
- [21] J. P., Womack, D. T., Jones, & D., Roos. "La máquina que cambió el mundo: La historia de la Producción Lean, el arma secreta de Toyota que revolucionó la industria mundial del automóvil". Profit editorial, 2017
- [22] H. P., Díaz, O. G. S., Rivera, & J. A. G., Guerra. "Filosofía Lean Construction para la gestión de proyectos de construcción: una revisión actual. *AVANCES Investigación en ingeniería*", 11(1), 32-53., 2014
- [23] Koskela, L. (1992). *Application of the new production philosophy to construction*. Stanford University, USA. 1992
- [24] J., Sánchez, "Project management models: Lean thought project management", *Dyna*, 2012
- [25] R. F., Aziz, & S. M., Hafez. "Applying lean thinking in construction and performance improvement". *Alexandria engineering journal*, 52(4), 679-695, 2013
- [26] I., Bakry, O., Moselhi, & T., Zayed. "Optimized scheduling and buffering of repetitive construction projects under uncertainty". *Engineering, Construction and Architectural Management*, 23(6), 782-800, 2016.
- [27] G, Shang, L. S., Pheng. "The Last Plan-ner System in China's construction industry- a SWOT analysis on implementation", 2014

El enfoque del sector público en la planificación logística urbana en la zona centro de Barranquilla: Consideraciones clave.

Diego Suero, Universidad Libre De Barranquilla, Universidad del Norte, Barranquilla,
(diego.suerop@unilibre.edu.co)

Elkin Rojas, Universidad Libre De Barranquilla, Colombia, (elkine-rojasm@unilibre.edu.co)

Valentina Márquez, Universidad Libre De Barranquilla, Colombia, (valentina-marquezv@unilibre.edu.co)

Abstract— Este estudio analiza el impacto de la planificación logística en la zona centro de Barranquilla, considerando la visión del sector público sobre planificación urbana, transporte y operaciones logísticas. Se evaluarán políticas de implementación que se identifican como oportunidades para mejorar la eficiencia de operaciones logísticas, con el fin de impulsar el desarrollo económico y social de la zona.

I. INTRODUCCION

La logística urbana desempeña un papel fundamental en el desarrollo y la sostenibilidad de las ciudades en todo el mundo, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas, donde la eficiencia en la gestión de mercancías es crucial para garantizar un funcionamiento fluido de la economía local. En este contexto, la zona centro de Barranquilla se presenta como un caso de estudio relevante, dado su papel como centro neurálgico de actividades comerciales e industriales.

El continuo crecimiento económico y demográfico de Barranquilla ha generado importantes desafíos en términos de movilidad, acceso a servicios y gestión de infraestructuras. La planificación de la logística urbana en la zona centro de la ciudad se ha convertido en un aspecto crítico para abordar la creciente demanda de transporte de mercancías, optimizar la distribución de productos y reducir los impactos negativos asociados, como la congestión del tráfico y la contaminación ambiental.

El objetivo de este estudio es realizar un análisis desde el enfoque del sector público en la planificación de la logística urbana en la zona centro de Barranquilla, teniendo en cuenta conceptos como logística urbana y ciudad logística, que se han convertido en factores decisivos para el desarrollo y la competitividad del tejido económico de una región. El aumento del volumen de tránsito en las ciudades capitales del mundo, junto con la fuerte presión urbanística y la necesidad de preservar el medio ambiente, ha llevado a los organismos públicos a reconocer y utilizar la gestión de la logística urbana como una herramienta básica para la competitividad de toda ciudad. [1]

La distribución urbana de mercancías, conocida mundialmente como logística de última milla o logística urbana, se ha

convertido en un importante segmento de actividad que debe ser gestionado y que afecta de manera integral tanto a la administración pública como a las empresas privadas, representando una parte significativa de sus costos logísticos y del nivel de servicio a los clientes. En los últimos años, ha surgido el concepto de "ciudades logísticas" como una nueva área en la gestión de la planificación del transporte terrestre, buscando equilibrar la eficiencia necesaria para la distribución urbana de mercancías con los costos sociales involucrados, como la congestión del tráfico, los impactos ambientales y la conservación de la energía [2]. Se pretende examinar cómo las decisiones de planificación, tanto a nivel de disposición de espacios como de políticas, afectan a la eficiencia, la sostenibilidad y las empresas en esta área clave de la ciudad.

II. MARCO TEÓRICO

La logística urbana es un conjunto de actividades que tienen como objetivo gestionar la distribución de bienes y servicios dentro de las zonas urbanas. Es por esto por lo que se centra en la planificación, organización y control de los flujos de mercancías que se producen en las ciudades, con el objetivo de Asegurar la rapidez y la sostenibilidad de los procesos logísticos en las grandes urbes. Este tipo de logística lleva a cabo las actividades que permiten el abastecimiento de productos, como la recepción, el almacenamiento, la preparación y la distribución de bienes y servicios. Por esta razón, se considera esencial para el correcto funcionamiento de las ciudades, ya que garantiza que los productos lleguen a los consumidores de manera eficiente y oportuna. [3]

La principal razón por la cual la logística urbana se ha vuelto tan importante en los últimos años es debido a la aparición del comercio electrónico, cuyo crecimiento ha transformado la forma en que se realizan los envíos, permitiendo a los consumidores recibir sus pedidos en menos de 24 horas. Además, un estudio de la consultora Deloitte señala que más del 70% de los usuarios encuestados repiten compra si los procedimientos de entrega han resultado satisfactorios, lo que la convierte en una parte fundamental de la Economía. Pese a su importancia en la cadena de suministro, la logística urbana enfrenta una serie de retos importantes debido a las características propias de las zonas urbanas, entre los cuales se encuentran los siguientes:

Congestión del tráfico: En las ciudades, el tráfico suele ser un problema importante, lo que puede afectar negativamente la eficiencia y rapidez de las entregas. Además, esta situación también puede aumentar los costos operativos de las empresas, ya que los vehículos de transporte deben utilizar más combustible y los conductores pueden perder más tiempo en los desplazamientos.

Inseguridad: Este problema puede manifestarse de varias formas, como el robo de mercancías (que es el más común) y la vandalización de los vehículos. Estas amenazas pueden tener un impacto significativo en la eficiencia y la rentabilidad de las operaciones de logística urbana, así como en la seguridad de los trabajadores.

Falta de espacio: En las zonas urbanas, el espacio para la recepción, almacenamiento y distribución de mercancías suele ser limitado, lo que puede dificultar la gestión de las entregas y aumentar los costos operativos.

Para llevar a cabo un análisis exhaustivo de los factores característicos del entorno urbano, es esencial utilizar una variedad de herramientas logísticas. Estas herramientas incluyen: sistemas de información avanzados, sistemas de cooperación en transporte de carga, terminales logísticas públicas, utilización de vehículos de carga compartidos, sistemas subterráneos de transporte de carga, áreas con control de acceso. De esta manera, la logística urbana promueve la colaboración y la cooperación entre los principales actores en una economía de mercado. [4]

En el pasado, más precisamente a principios de los años setenta, nos damos cuenta de que hubo un gran aumento en la cantidad de carga transportada. Este período creó la necesidad de regulaciones para evitar la presencia de vehículos pesados en las ciudades y reducir el impacto de la distribución de mercancías en la movilidad urbana. Esta situación continuó hasta los años ochenta, cuando los problemas relacionados con el flujo de tráfico aumentaron, generando una gran presión pública. A partir de la década de 1990, se desarrollaron investigaciones relacionadas con el tráfico de vehículos y se recopilaban datos que ayudaron a cuantificar los problemas críticos, como el gran número de viajes con poco o ningún costo dentro de las ciudades. [5]

El transporte de carga, particularmente el transporte por carretera representa una parte considerable de estos totales, ya que los camiones, aunque solo representan el 4.3% de todos los vehículos de motor registrados, generan el 9.8% de las millas recorridas por vehículo, consumen el 26.5% del combustible y producen el 41% de las emisiones de gases de efecto invernadero [6]. Sin embargo, el transporte de carga es un componente crucial de las economías modernas; sin un flujo eficiente y oportuno de suministros, la vida moderna no sería posible [7]. Con un reconocimiento cada vez mayor de los impactos ambientales, surge una enorme presión para mitigar las externalidades negativas de la actividad del transporte. Estas preocupaciones han estimulado el interés en la implementación de iniciativas para reducir esos efectos negativos y maximizar los beneficios sociales netos

producidos por la actividad de transporte de mercancías. Sin embargo, lograr este ambicioso objetivo se complica por la falta de un conjunto codificado de conocimientos que oriente a los responsables de las políticas.

También se observan casos donde se implementan políticas similares, como el uso de bahías. Aquí se hace evidente el papel crucial de la logística urbana en la funcionalidad de las ciudades y su contribución a la sostenibilidad, destacando la necesidad de integrar el transporte de carga en los planes de movilidad urbana mediante soluciones flexibles que mejoren la eficiencia. Esto implica políticas que respalden los procesos logísticos en lugar de obstaculizarlos.

Actualmente se ha desarrollado un modelo de localización de bahías de carga y descarga para integrarlo en los planes de movilidad urbana, compuesto por modelos agregados e integrales. El primero, basado en teoría de colas, determina la cantidad necesaria de bahías, mientras que el segundo considera aspectos como la distribución espacial y los comportamientos vehiculares. Aunque el modelo agregado tiene limitaciones, como la uniformidad de la actividad y la necesidad de ajustes, el modelo integral ofrece una solución más precisa en cuanto a la cantidad y ubicación de las bahías, como se evidenció en un caso de estudio en el centro histórico de Santiago, donde el modelo agregado propondría la implementación de 139 bahías distribuidas estratégicamente entre 29 cuadras.

La implementación de estas soluciones en los planes de movilidad urbana requiere consensos y ajustes según las realidades locales y los objetivos de los proyectos urbanísticos en desarrollo. El estudio ofrece una guía replicable para otros centros urbanos que buscan integrar la logística en sus planes de movilidad [8]. Por otro lado, también podemos analizar una propuesta de implementación de bahías y zonas de carga y descarga en la ciudad de Lima en el documento 'Logística Urbana Sostenible: Análisis y propuestas para la mejora de los sistemas logísticos urbanos a nivel distrital e interdistrital', donde la Municipalidad de Miraflores establece regulaciones detalladas sobre cómo sería el uso de estas bahías, como horarios de uso, tiempos máximos de operación y áreas de reparto [9]. Estas regulaciones se basan en investigaciones que demuestran los beneficios de asignar espacios específicos para carga y descarga, como la reducción de congestión vehicular y emisiones. Asimismo, se apoyan en estudios internacionales, como los realizados en Washington D.C. y por el Departamento de Transporte de Nueva York, que ofrecen enfoques variados, como la implementación de bahías de carga y descarga en la calzada con el uso de parquímetros y estrategias de precios, hasta regulaciones de uso específicas. Esta iniciativa fue bien recibida por parte de los operadores logísticos [10]. Aunque también se mantuvo la disponibilidad de estacionamiento para otros vehículos, priorizando los de carga. Las regulaciones mencionadas incluyen el concepto de 'Clearway' durante horas punta y un sistema de reservas de bahías. La primera consiste en designar una o varias calles donde durante las horas pico no se permite ningún tipo de estacionamiento, únicamente la entrega de mercancías en bahías autorizadas. La segunda se centra en la coordinación entre stakeholders y fiscalizadores.

En Japón, se implementó un proyecto piloto que redujo en un 56% la cantidad de vehículos estacionados en la calzada para operaciones de carga, gracias a un sistema de reservas telefónicas y programación de entregas según el horario de reserva. [11]

Estrategias como estas también han sido objeto de interés para su implementación en ciudades colombianas, como en el caso de Bogotá; sin embargo, estas estrategias no han sido bien recibidas por parte de las comunidades locales. Un ejemplo de esto ocurrió el pasado 19 de enero, cuando la comunidad de Pablo VI en la localidad de Teusaquillo expresó su oposición a la implementación de bahías de carga y descarga. Argumentaron que esto afectaría directamente su economía debido a los costos asociados. Esta política comenzó a operar en 2021 en la ciudad de Bogotá, específicamente en las localidades de Usaquén, Teusaquillo, Chapinero, Fontibón, Puente Aranda, Kennedy y Suba, bajo la supervisión de la terminal de transporte.

No es extraño y tiene sentido la implementación de estas bahías en ciudades grandes como Bogotá o Barranquilla, donde la densidad de población y el comercio son muy altos. Si a esto se le suman los espacios limitados para estacionar y transitar, al momento de realizar actividades logísticas se genera como resultado la manifestación de congestión constante en el área y la circulación de camiones que esperan por un espacio de estacionamiento. [12]

III. RESULTADOS

Durante este estudio se realizaron encuestas a diversos entes del sector público como los son: La secretaria de planeación, secretaria de movilidad, asesores de planeación territorial, coordinadores de registro de tránsito, oficina de gestión de tránsito, funcionarios públicos y policías, para conocer su perspectiva sobre las propuestas planteadas, como el uso de bahías, CEDIS, peajes de ingreso a la zona y parqueaderos fuera de la misma. A continuación, se presentan los principales hallazgos derivados de las entrevistas realizadas con cada uno de los actores en sus lugares de trabajo.

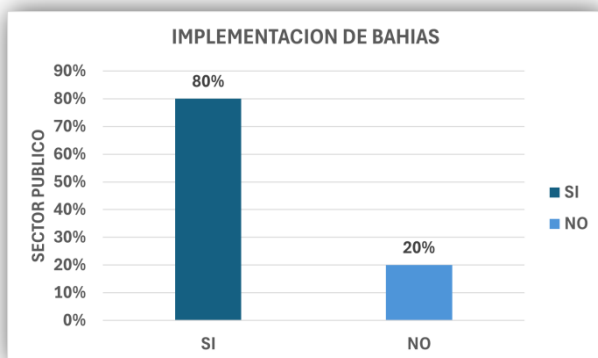


Figura 1: Implementación de bahías.

La Fig. 1 Muestra una clara inclinación hacia respuestas positivas sobre la implementación y uso de bahías dentro de la zona centro, destinadas a reducir la congestión vial y asegurar

la carga y descarga de mercancías, priorizando la seguridad y monitoreo constante durante su uso. También se tienen ciertas sugerencias en consideración como, por ejemplo: La oficina de gestión de tránsito sugiere la presencia de vigilancia durante el uso de las bahías propuestas.

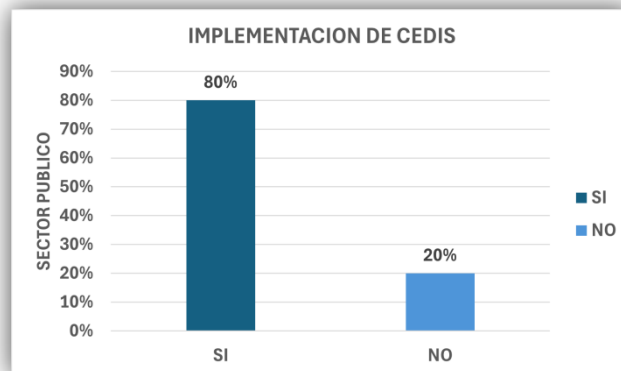


Figura 2: Implementación de CEDIS.

La Fig. 2 Presenta la comparación de respuestas a favor y en contra del uso e implementación de CEDIS en la zona centro, donde se aprecia una mayor aceptación por parte de los entrevistados, teniendo en cuenta especialmente el tipo de carga que estos recibirán.

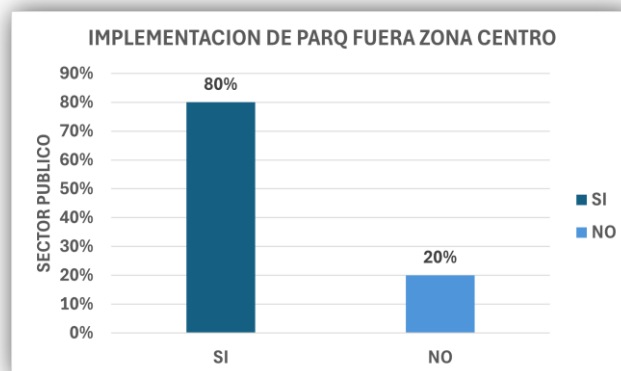


Figura 3: Implementación de parqueaderos fuera de la zona centro.

La Fig. 3 Expresa la diferencia entre las respuestas a favor y en contra de la implementación y desarrollo de parqueaderos fuera de la zona centro con la intención de descongestionar y disminuir el tránsito vehicular dentro de la zona centro, donde se observa una clara inclinación hacia la aceptación de dicha propuesta. Se sugiere por parte de la oficina de planeación la implementación de un medio de transporte que conecte el parqueadero con la zona centro.

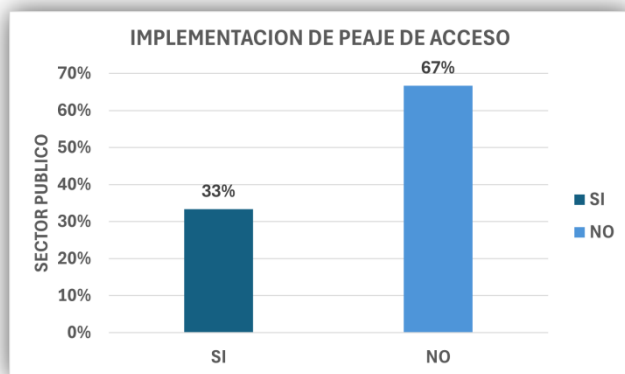


Figura 4: Implementación de peaje de acceso a la zona centro.

La Fig. 4 Expone las respuestas encontradas sobre la posición de los entrevistados respecto a la implementación y uso de un peaje de acceso a la zona centro, donde claramente se evidencia un mayor rechazo hacia dicha propuesta y lo que implica, ya que esto representaría un sobre costo en el transporte de mercancías y en el comercio, considerando la falta de infraestructura.

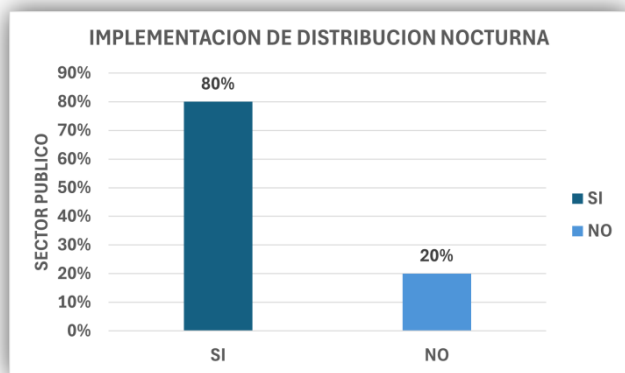


Figura 5: Implementación de distribución nocturna.

La Fig. 5 Presenta los resultados de las encuestas sobre la distribución nocturna de mercancías en la zona centro de Barranquilla. Los datos revelan una aceptación considerable hacia esta estrategia, destacando su potencial para reducir la congestión diurna y mejorar la eficiencia en la entrega de productos. Sin embargo, también emergen preocupaciones sobre la seguridad y el impacto en la calidad de vida de los residentes nocturnos. Estos hallazgos sugieren que, aunque la distribución nocturna podría aliviar el tráfico diurno y optimizar la logística urbana, es fundamental abordar las inquietudes relacionadas con la seguridad y el bienestar de la comunidad para garantizar una implementación exitosa y equilibrada.

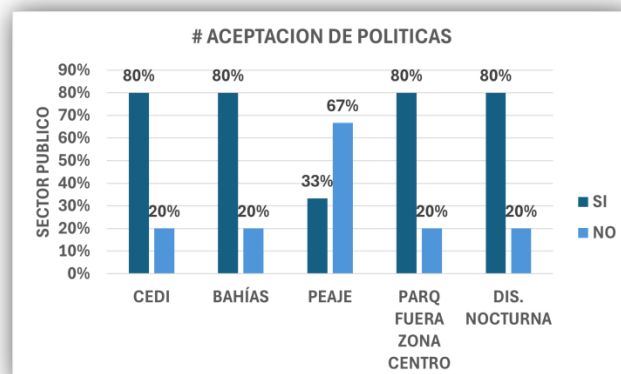


Figura 6: Aceptación y rechazo de políticas.

La Fig. 6 Muestra el resumen de respuestas obtenidas en relación con las políticas propuestas durante el estudio. Los datos revelan que las políticas con mayor aceptación fueron la implementación de bahías en la zona, centros de distribución (CEDIS) y estacionamientos fuera del área central, así como estrategias como la distribución nocturna. Estas medidas buscan reducir la congestión en la zona. En contraste, propuestas como la implementación de un peaje para acceder al centro no contaron con el mismo apoyo, aunque están destinadas a mitigar la congestión, podrían incrementar los costos operativos, los servicios y las actividades comerciales diarias en el área.

IV. DISCUSIÓN

El análisis realizado revela una aceptación generalizada de las propuestas para mejorar la logística urbana en la zona centro de Barranquilla, aunque también pone de manifiesto algunos desafíos y consideraciones importantes. La implementación de bahías de carga, Centros de Distribución (CEDIS), parqueaderos fuera de la zona y peajes de acceso ha suscitado un debate significativo entre los entrevistados, reflejando tanto sus expectativas como sus preocupaciones.

En cuanto a las bahías de carga, los resultados muestran un apoyo mayoritario hacia su implementación, destacando la necesidad de asegurar la carga y descarga de mercancías de manera ordenada y eficiente. Esto es congruente con la literatura existente que subraya la importancia de estas infraestructuras para reducir la congestión y mejorar la seguridad vial en zonas urbanas densamente pobladas. Las recomendaciones para fortalecer la vigilancia y el monitoreo durante el uso de estas bahías son indicativas de una creciente conciencia sobre la importancia de una gestión efectiva para evitar problemas como el estacionamiento indebido y la obstrucción del tráfico.

El análisis de la viabilidad y aceptación de los CEDIS sugiere que su implementación podría ser beneficiosa para la zona centro, siempre que se consideren las características específicas del tipo de carga que recibirán. La literatura confirma que los CEDIS pueden actuar como puntos de consolidación que optimizan la distribución urbana y reducen el número de viajes necesarios para entregar mercancías,

disminuyendo así la congestión y el impacto ambiental. Sin embargo, es crucial que estos centros se ubiquen estratégicamente para maximizar su eficacia y minimizar el impacto en las comunidades locales.

La propuesta de desarrollar parqueaderos fuera de la zona centro también ha recibido un respaldo considerable. Esta estrategia está alineada con enfoques internacionales que sugieren que proporcionar estacionamiento en áreas periféricas y conectar estas zonas con el centro mediante sistemas de transporte eficientes puede descongestionar el tráfico en áreas urbanas congestionadas. La implementación de un medio de transporte que enlace estos parqueaderos con el centro es una sugerencia clave que responde a la necesidad de garantizar que esta estrategia no solo reduzca la congestión, sino que también mantenga la accesibilidad y eficiencia en el transporte de mercancías.

Por otro lado, la propuesta de establecer un peaje de acceso a la zona centro ha generado una notable resistencia. Esta resistencia puede ser atribuida a la percepción de que los peajes aumentan los costos operativos y afectan negativamente al comercio local, especialmente en contextos donde la infraestructura aún no está completamente desarrollada para manejar los flujos de tráfico de manera óptima. La literatura también apoya esta preocupación, señalando que los peajes pueden tener efectos adversos si no se implementan con una planificación cuidadosa y un análisis exhaustivo de la infraestructura existente.

Además de las propuestas específicas, el estudio destaca la necesidad de una planificación logística urbana más integral y adaptativa. La gestión efectiva de la logística urbana debe considerar no solo las soluciones de infraestructura, sino también la integración de tecnologías avanzadas y la colaboración entre diversos actores, incluidos los sectores público y privado. Las ciudades enfrentan desafíos crecientes en términos de movilidad, sostenibilidad y calidad de vida, y la logística urbana juega un papel crucial en abordar estos desafíos de manera eficaz. La experiencia internacional y los estudios de caso, como los realizados en ciudades como Santiago y Lima, proporcionan valiosas lecciones sobre la implementación de estrategias logísticas y la importancia de un enfoque adaptativo que responda a las necesidades locales. En resumen, el estudio revela que la planificación logística urbana en Barranquilla requiere un enfoque holístico que equilibre las necesidades de eficiencia, sostenibilidad y accesibilidad. Las propuestas evaluadas ofrecen un punto de partida sólido, pero su implementación exitosa dependerá de la capacidad para adaptarse a las realidades locales y de la colaboración continua entre todos los actores involucrados. A medida que Barranquilla continúa creciendo y enfrentando nuevos desafíos, la planificación logística urbana será fundamental para garantizar que la ciudad pueda manejar eficazmente el flujo de mercancías, mejorar la calidad de vida de sus habitantes y promover un desarrollo económico sostenible.

V. CONCLUSIÓN

El presente estudio ha explorado el enfoque del sector público en la planificación logística urbana en la zona centro de Barranquilla, destacando consideraciones clave para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en el transporte y la distribución de mercancías en áreas urbanas densamente pobladas. A partir del análisis de la situación actual y las prácticas existentes, se han identificado varias áreas de oportunidad y recomendaciones para fortalecer la planificación logística urbana en la ciudad.

En primer lugar, se destaca la importancia de una mayor integración entre los diferentes actores involucrados en la planificación logística, incluidas las autoridades municipales. La colaboración y la coordinación entre estos actores son fundamentales para desarrollar soluciones efectivas y sostenibles que aborden los desafíos logísticos en la zona centro de Barranquilla.

Además, se enfatiza la necesidad de implementar estrategias innovadoras para optimizar las operaciones de transporte y distribución en el área urbana, como el uso de bahías, CEDIS, peajes de acceso a la zona y parqueaderos externos. Esto tiene como objetivo mitigar el impacto negativo causado por la alta congestión vehicular en la zona centro de Barranquilla.

En conclusión, el enfoque del sector público en la planificación logística urbana en la zona centro de Barranquilla plantea una visión integral y colaborativa que integre los desafíos actuales y futuros de manera efectiva y sostenible. Al adoptar enfoques y estrategias innovadoras, es posible transformar la logística urbana en una fuerza impulsora del desarrollo económico, social y ambiental en la ciudad.

REFERENCIAS

- [1] J. d. j. Álvarez y A. E. Sarmiento, «The Urban Logistics, the Logistics City, and the Logistics Land use Planning,» *Revista RETO*, vol. 4, n° 4, pp. 21-40, 6 11 2016.
- [2] I. Salazar Aranzazu, *Ciudad logística y plataformas logísticas urbanas*, Tesis de Grado Universidad Javeriana, Bogotá, 2012.
- [5] R. S. y. F. Weikert, Logística internacional pospandemia: análisis de las industrias aérea y de transporte marítimo de contenedores, *Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*, n° 162, 2020.
- [6] J. J. P. Henao y Carlos A. González-Calderón, «Consumo de combustible en vehículos para transporte por carretera –modelos predictivos,» *Revista ingenierías universidad de medellin*, 25 10 2013.
- [7] José Elías Jiménez Sánchez, Marco conceptual de la cadena de suministro: Un nuevo enfoque logístico, *Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte*, n° 215, 2002.
- [8] M. Cuevas, Metodo de localizacion de bahias de carga

y descarga: aplicacion al plan integral de movilidad de Santiago centro. Tesis de Grado Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2016.

- [11] E. Taniguchi, Y. Imanishi, Public Sector Governance of Urban Freight Transport Management, *Procedia - Social and Behavioral Science* 125, 345-357, 2014.
- [12] Jaller, M., Holguín-Veras, J., & Hodge, S. D. (2013). Parking in the City: Challenges for Freight Traffic. *Transportation Research Record*, 2379(1), 46-56. <https://doi.org/10.3141/2379-06>