



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

REVISTA. Ingeniería

Volumen 26 • Número 2 • ISSN 0121-750X • E-ISSN 23448393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL

2021

REVISTA Ingeniería

Volumen 26 · Número 2 · Año 2021 · ISSN 0121-750X · E-ISSN 2344-8393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Carrera 7 No. 40-53
Edificio Administrativo
Piso 7 - Facultad de Ingeniería
Bogotá, Colombia
Teléfono: + 57 (1) 323 93 00 ext. 2413
Correo revista:
revista_ing@udistrital.edu.co

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving>

POSTURA EDITORIAL Y AUDIENCIA

La Revista INGENIERÍA es una publicación de carácter científico enfocada en la gran área de conocimiento de Ingeniería y Tecnología, de acuerdo a la clasificación de la OCDE, con una periodicidad cuatrimestral editada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La Revista está dirigida a la comunidad académica, investigadores, egresados, sectores productivos y en general al público interesado en los temas del campo de la Ingeniería y la Tecnología. Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la Ingeniería y la Tecnología a través de la publicación de artículos originales e inéditos, con pertinencia local o internacional.

EDITOR

Nelson L. Díaz, PhD.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

COMITÉ EDITORIAL

Sarah Greenfield, PhD.
Faculty of Technology of
Monfort University,
Reino Unido

Alonso Salvador Sanchez, PhD.
Universidad de Alcalá,
España

Jose Marcio Luna, PhD.
Perelman School of Medicine,
University of Pennsylvania, Estados Unidos

José Luis Villa, PhD.
Universidad Tecnológica de
Bolívar, Colombia

César Leonardo Trujillo Rodríguez, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Josep M. Guerrero, PhD.
Aalborg University, Dinamarca

Carlos Andrés Peña, PhD.
Institute for Information and Communication Technologies - Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Suiza

Iván Santelices Malfanti, PhD.
Universidad del Bío-Bío,
Chile

Carlos Eduardo Moreno, PhD.
Universidad Nacional de
Colombia

Víctor Hugo Grisales, PhD.
Universidad Nacional de
Colombia

Juan Carlos Figueroa, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

COMITÉ CIENTÍFICO

Germán Jairo Hernández, PhD.
Universidad Nacional
de Colombia

Paulo Gaona García, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Gustavo Puerto Leguizamón, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Elvis Eduardo Gaona García, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Germán Méndez Giraldo, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Francisco Santamaría Piedrahita, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Diego Rodríguez Patarroyo, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

DIRECTIVAS

Ricardo García Duarte
Rector

Giovanny Tarazona Bermúdez, PhD.
Director Centro de Investigación
y Desarrollo Científico

Julio Barón Velandía, PhD.
Decano de la Facultad de Ingeniería

PREPARACIÓN EDITORIAL

Fabian Ríos Gutierrez, MSc.
Gestor Editorial

Pablo Estrada Suarez
Corrección de Estilo

José Daniel Gutierrez Mendoza
Corrección de Estilo

Julian Arcila-Forero, MSc.
Diseñador *LaTeX*

PERMISO DE REPRODUCCIÓN

Open access



Los artículos incluidos en esta edición se encuentran bajo la licencia "Atribución - No Comercial - Compartir igual": esta licencia permite a otros distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de tu obra de modo no comercial, siempre y cuando te den crédito y licencien sus nuevas creaciones bajo las mismas condiciones.

Atribución - No Comercial - Compartir igual.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

Ni la Revista INGENIERÍA, Editor, Comité Editorial, Comité Científico, Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital F.J.C., otorgan ninguna garantía, expresa o implícita, a asumen responsabilidad alguna por la exactitud, completitud o utilidad de cualquier información, aparato, producto o proceso divulgado, o que represente que su uso no infrinja derechos privados. La mención o referencia a algún producto, proceso o servicio comercial en específico, por su marca comercial, marca registrada, fabricante o cualquier otra denominación, no implica ni constituye su endoso, recomendación endosa, recomendación o favorecimiento por parte de la Revista INGENIERÍA. Los juicios y opiniones expresadas por los autores en este medio son de su responsabilidad y no establecen, reflejan o comprometen los de la Revista INGENIERÍA.

COSTO DE PROCESAMIENTO DE ARTÍCULOS

La Revista INGENIERÍA no realiza ningún cobro por las postulaciones, evaluación y publicación de los artículos sometidos. La Universidad Distrital Francisco José de Caldas asume los gastos relacionados con el proceso de edición, gestión y publicación. Los Pares Evaluadores realizan su contribución de manera voluntaria y sin retribución económica.

INDIZADA EN



ÁRBITROS EN ESTA EDICIÓN

Juan Arrieta Posada, MSc.
EAFIT

Leonardo Rodriguez, PhD.
Universidad EAN

Fernando Castaño, PhD.
Universidad de Sevilla

Darwin Castillo, MSc.
Universidad Técnica Particular de Loja

Ramiro Chaparro Vargas, PhD.
DataUp

Jorge Silva Leal, PhD.
Universidad Santiago de Cali

Diego Ordóñez-Camacho, PhD.
Universidad Tecnológica Equinoccial

María Gómez Álvarez, PhD.
Universidad de Medellín

José Moura Berodia, PhD.
Universidad de Cantabria

Marco A. Miranda Ackerman, PhD.
Universidad Autónoma de Baja California

Carlos Moreno Mantilla, PhD.
Universidad Nacional de Colombia

Paulo Narvaéz- Rincón, PhD.
Universidad Nacional de Colombia

Alejandro José Uriz, PhD.
Universidad Nacional de Mar del Plata

Nathalie Cabirol, PhD.
Universidad Nacional Autónoma de México

Ofelia Valdes-Rodriguez, PhD.
Academia de Desarrollo Regional Sustentable

Ana Gil-González, PhD.
Universidad de Salamanca

Alfonso Campos-Amezcuca, PhD.
Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias

Luis Rico Riveros, PhD.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

J. P. Sepulveda Rojas, PhD.
Universidad de Santiago de Chile

Miguel Zavala, PhD.
Molina Center for Energy and the Environment

Ann Godelieve Wellens, MSc.
Universidad Nacional Autónoma de México

Miguel de Simón-Martín, PhD.
Universidad de León

Diana Contreras, PhD.
Newcastle University

Edgar Obando-Paredes, MSc.
Universidad del Cauca

José Mejía Muñoz, PhD.
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Paul Vargas Jentsch, PhD.
Escuela Politécnica Nacional

José Valero Martín Sánchez, PhD.
Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria

Juan Jiménez-Arias, PhD.
Universidad de Cádiz

Javier Castillo García, PhD.
Universidad Santiago de Cali

Miguel Morales Trujillo, PhD.
University of Canterbury

Jaime Mora-Vargas, PhD.
Tecnológico de Monterrey

José Martínez Flores, PhD.
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

Fabricio Espejel-Ayala, PhD.
Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica S.C.

Jesús Vargas Hernández, PhD.
Colegio de Postgraduados

Alberto Poncela, PhD.
Universidad de Málaga

Miguel A Sandoval, PhD.
Universidad de Guanajuato

Eduardo Garzón, PhD.
Universidad de Almería

A. Armin Razmjoo, PhD.
Universitat Politècnica de Catalunya

Vicente J. Nadal-Mora, PhD.
Universidad Nacional de La Plata

María Mercedes Echarte, PhD.
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Buenos Aires

Olga Usuga Manco, PhD.
Universidad de Sao Pablo

Rodolfo Sosa-Echeverría, PhD.
Universidad Nacional Autónoma de México

Mariela aguilera, PhD.
Universidad Nacional de San Juan

TABLA DE CONTENIDOS

Editorial

- La universidad en la sociedad de la ignorancia** 121
La universidad en la sociedad de la ignorancia
Diego Julian Rodríguez

Ingeniería Industrial

- A Maximal Profit Supply Chain Design: A Biopesticide Production-Distribution Case Study** 123
Diseño de máxima utilidad para cadenas de suministro: un caso de producción y distribución de bioplaguicidas

Adriana Moros Daza, Henry Mendoza Crespo, René Amaya Mier, Mauricio Ortiz Velásquez

- Challenges in the Modeling of Traceability in Food Supply Chains** 143
Retos en el modelado de la trazabilidad en las cadenas de suministro de alimentos

Tatiana Maya Trujillo, Javier Arturo Orjuela Castro, Milton M. Herrera

- The Distribution System and the Efficacy in Children Food Assistance Programs. The Case of Bienestarina-Colombia** 173

El sistema de distribución y la eficacia en programas de asistencia nutricional infantil. Caso Bienestarina – Colombia

Feizar Rueda-Velasco, Wilson Adarme-Jaimes, Jesús González-Feliu

Ingeniería Ambiental

- Evaluation of Nitrogen Mineralization in an Acid Soil with Inorganic and Organic Fertilization** 197
Una propuesta de mejoramiento del estándar Essence mediante el uso de unificación terminológica

Carlos Mario Zapata-Jaramillo, Antony Henao-Roqueme

Ingeniería de Sistemas

- A proposal for improving the Essence standard by using terminology unification** 213
Una propuesta de mejoramiento del estándar Essence mediante el uso de unificación terminológica

Carlos Mario Zapata-Jaramillo, Antony Henao-Roqueme

- A Metaheuristic Solution for the School Bus Routing Problem with Homogeneous Fleet and Bus Stop Selection** 233

Una solución metaheurística al problema de planificación de rutas de autobuses escolares con flota homogénea y selección de paradas

Ana Camila Pérez Pérez, Eduardo Sánchez Ansola, Alejandro Rosete

- Blurred image restoration using a regularized linear programming model** 254
Restauración de imágenes borrosas usando un modelo regularizado de programación lineal

José Fuentes, Jorge Mauricio Ruiz V.

Ingeniería Eléctrica y Electrónica

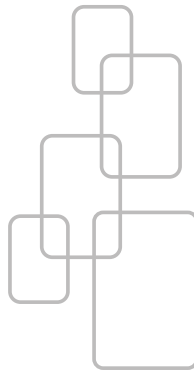
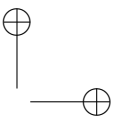
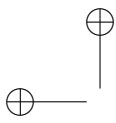
- Effect of Soiling on the Performance of Photovoltaic Modules in Bogotá** 273
Efecto de la suciedad en el desempeño de módulos fotovoltaicos en Bogotá

Fabián León-Vargas, Maira García-Jaramillo, Gelver Magín Yara, Alejandro Parra

- Vision-based Software Tool System for Position Estimation Using a Smartphone** 284
Sistema de herramientas software basado en visión para la estimación de posición usando un teléfono inteligente

Urbano Julio, Bacca-Cortes Bladimir, Buitrago-Molina José

- Instructions for Authors** 306



La universidad en la sociedad de la ignorancia

La humanidad por primera vez en la historia se ha convertido en el motor de la evolución, no solo por medio de cambios controlados de los genes, sino que ha moldeado una cultura desprendida de relatos míticos. Surge entonces la pregunta: ¿cómo fue esto posible? Muchas líneas de pensamiento han intentado dar respuesta a esta pregunta, desde las suscritas al mundo antropológico, sociológico, económico, incluso desde la epistemología, pero en todas se observa un punto en común, la generación de nuevo conocimiento científico.

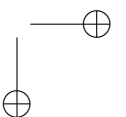
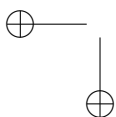
Una de las grandes problemáticas que se han detectado en las universidades modernas, como reflejo de una problemática general de nuestros tiempos, es como evitar lo menos posible obstáculos epistemológicos al momento de dividir y subdividir el conocimiento, y más allá, cómo identificar las líneas divisorias entre las diferentes formas de pensar. Varios ejemplos se pueden resaltar en la división usual del currículo, ¿en qué punto el desarrollo del discurso de la ingeniería se desprende del mundo físico y matemático?, la economía, la psicología y la ciencia de datos se han convertido en un solo conjunto, lo que ha conllevado a una serie de técnicas para entender (y transformar) las transacciones económicas y la configuración del ahora y del futuro social. Llevando al fin de la era de los sabios y ha dado inicio a una época marcada por los expertos, personas que son muy especializadas en un solo tema o un número restringido, pero es un completo ignorante en la mayoría de saberes que no están conectados con el tema de su experticia.

Por otro lado, en el mundo de la hiperconexión, producto de la implementación masiva de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación, nuestra capacidad para acceder al conocimiento se ve inevitablemente condicionada por la acumulación exponencial de información. Las mismas tecnologías que hoy articulan una sociedad global y permiten acumular saber nos están convirtiendo en individuos cada vez más ignorantes en muchas áreas. Es la primera vez en la historia que somos capaces de comunicarnos de forma global, pero no tenemos nada que decir, los medios de comunicación se han convertido en el faro de la sociedad, con el costo de relegar al desprecio la reflexión profunda y crítica.

Open access



Citación: D. Rodríguez, "La universidad en la sociedad de la ignorancia", Ingeniería, vol. 26, no. 2, pp. 121-122, (2021).
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.18028>



Con este conocimiento la humanidad ha podido dominar las fuerzas de la naturaleza pero como individuos cada vez somos más ignorantes. Tarde o temprano se desvanecerá el espejismo actual y descubriremos que, en realidad, nos encaminamos hacia una sociedad de la ignorancia. La desigualdad se ha presentado tácitamente entre dos grupos sociales, aquel que reconoce que las nuevas formas de comunicación requieren una mirada crítica, y otro sector que se limita a ser un ignorante por su falta de criterios en la selección de los contenidos que consume.

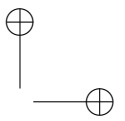
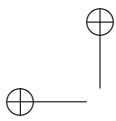
Esta diferenciación entre la nueva forma recontextualizada de la dialéctica esclavo-amor se evidencia en las nuevas tribus que han sido protagonistas de las redes sociales por los últimos años, terraplanistas, antivacunas, entre muchas otras. En todas ellas se observa un desprecio por la evidencia científica, se centra todo análisis en los propios sentidos y se hace una oda a la ignorancia. Este comportamiento es reforzado por la cercanía que permiten los medios de comunicación semejantes en pensamiento, que en la mayoría de los casos es mediado por algoritmos que analizan el comportamiento por medio de Big Data e inteligencia artificial.

La sociedad ha perdido la racionalidad como centro de las discusiones, se desprecia a aquellos que llaman a la calma como precursora del pensamiento estructurado. La sociedad de la ignorancia está caracterizada por la emocionalidad, en particular la indignación producida por la duda, el cuestionamiento y de forma más relevante cuando se contrasta las ideas del ignorante con la evidencia científica. En muchas ocasiones, se deforma el discurso científico para apoyar las ideas base de estas tribus, como se ha observado en el último año en las teorías conspiranoicas sobre el origen del SARS-CoV-2, utilizadas hasta por las más altas esferas de la política internacional. Otro ejemplo es el cambio climático, donde se ha usado ciencia formal para desmentir a la evidencia científica, donde los contradictores de la causa antropogénica de la emisión de gases de efecto invernadero usan los ciclos solares para dar una explicación al aumento de la temperatura global.

Para ser propositivo, es necesario jugarse la piel, defender de forma activa el conocimiento científico, la razón y aunque suene contradictorio, el silencio que trae la calma que calla las emociones. Este compromiso debe ser parte integral de todos los miembros de la comunidad, en particular la universitaria, como faro histórico de la sociedad. Las universidades están llamadas a acoger en su seno estas discusiones sin olvidar su proyección hacia la realidad. Por esta razón se hace necesario desarrollar nuevos lazos de comunicación permanente entre la universidad y la comunidad. Es importante fortalecer todo tipo de canal, como son redes sociales o programas audiovisuales, para mejorar el contacto con la sociedad. Cuanto mayor sea la visibilización, mayor será la influencia del pensamiento científico en la sociedad de la ignorancia.

Diego Julian Rodríguez, PhD. 
djrodriguezp@udistrital.edu.co

Universidad Distrital Francisco José de Caldas



Research

A Maximal Profit Supply Chain Design: A Biopesticide Production-Distribution Case Study

Diseño de máxima utilidad para cadenas de suministro: un caso de producción y distribución de bioplaguicidas

Adriana Moros Daza^{* ID¹}, **Henry Mendoza Crespo**^{ID²},
René Amaya Mier^{ID¹}, **Mauricio Ortiz Velasquez**^{ID⁴}

¹Facultad de Ingeniería, Universidad del Norte, (Barranquilla-Colombia), ²Escuela Internacional de Administración y Marketing, Universidad Sergio Arboleda (Barranquilla-Colombia), ⁴Escuela de Negocio, Universidad del Norte (Barranquilla-Colombia). Correspondence email: amoros@uninorte.edu.co, henry.mendoza@correo.usa.edu.co, ramaya@uninorte.edu.co, mortiz@uninorte.edu.co

Recibido: 10/08/2020. Modificado: 08/04/2021. Aceptado: 14/04/2021.

Abstract

Context: This article shows the design of a supply chain for a company that will be located in the department of Sucre, Colombia. This company will produce two biopesticides that will be used to fight the *Burkholderia glumae* bacterium, which causes white panicle blight in rice crops. The first is derived from vegetal extracts, and the second is based on endophytic bacteria, both of proven use in attacking the crop bacterial disease.

Method: A modeling of the price and demand parameters is developed using information obtained from the databases of the DANE, FiBL, and Cotrisa institutions. Then, linear and mixed integer programming is used to decide between alternative markets that make up a maximum-profit international supply chain. For each biopesticide, thirteen scenarios subject to variations in price, demand, and installed capacity were considered.

Results: The vegetable biopesticide should be prioritized for commercialization in Colombia and China, since the utility obtained from such markets exceeds that of the bacterial one by 47% in favorable scenarios. Only in worst-case scenarios, the profits of the bacterial biopesticide exceed those of the vegetable one by 11%. Beyond a mere decision, the authors provide a casuistic heuristic for making decisions under uncertainty.

Conclusions: The decision-making process in this study can be seen as a prospective analysis of the most probable scenarios and the more conservative or riskier bets made by project investors. The contributions include the use of linear optimization for profit maximization in new contexts, such as investment decisions in foreign trade chains of new biopesticide products, as well as novel associations of such optimization models with forecasts and regressions to increase the scope of the products.

Keywords: biopesticide, organic agricultural supply, international supply chain design, alternative export markets, profit maximization, linear and integer programming

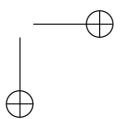
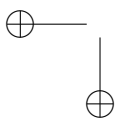
Acknowledgements: We thank the University of Sucre and University of Cordoba for participating in the development of this project.

Language: Spanish

Open access



Cite this paper as: Moros, A., Mendoza, H., Amaya, R., Ortiz, M.: Diseño de máxima utilidad para cadenas de suministro: un caso de producción y distribución de bioplaguicidas. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 2, pp. 123-142 (2021).
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
<https://doi.org/10.14483/23448393.16756>



Resumen

Contexto: Este artículo muestra el diseño de una cadena de suministro de una empresa que será ubicada en el departamento de Sucre, Colombia. Dicha empresa producirá dos bioplaguicidas que serán utilizados para combatir la bacteria *Burkholderia glumae*, causante de la enfermedad del añublo blanco de la panícula en cultivos de arroz, uno de origen vegetal, compuesto de extractos vegetales y otro de origen bacteriano, derivado de bacterias endófitas, ambos son agentes plaguicidas reconocidos de la enfermedad bacteriana de los cultivos.

Método: Se desarrolla una modelación de los parámetros precio y demanda, utilizando información obtenida de las bases de datos de las instituciones DANE, FiBL y Cotrisa. Luego, se usa programación lineal y entera mixta para decidir entre mercados alternativos que conforman una cadena de suministro internacional de máxima utilidad. Para cada bioplaguicida se consideraron trece escenarios sujetos a variación de precio, demanda y capacidad instalada.

Resultados: El bioplaguicida vegetal debería priorizarse para ser comercializado en Colombia y China, dado que en escenarios favorables la utilidad obtenida de tales mercados sobrepasa en 47 % las de producto compuesto de bacterias endófitas. Solo en peores escenarios, las utilidades del bioplaguicida compuesto de bacterias endófitas superan en 11 % a las del vegetal. Más allá de una mera decisión, los autores entregan una heurística casuística para tomar decisiones bajo incertidumbre.

Conclusiones: El proceso de toma de decisiones debe ser visto bajo un análisis prospectivo de los escenarios más probables y las apuestas más conservadoras o propensas al riesgo de los inversores del proyecto. Las contribuciones introducidas incluyen el uso de optimización lineal para maximizar utilidades en nuevos contextos de aplicación, tales como decisiones de inversión en cadenas de comercio exterior de nuevos productos bioplaguicidas, así como asociaciones de uso de tales modelos de optimización junto con pronósticos y regresiones para incrementar el alcance de los productos.

Palabras clave: bioplaguicida, suministro agrícola orgánico, diseño de cadena de suministro internacional, mercados de exportación alternativos, maximización de utilidades, programación lineal y entera

Agradecimientos: Agradecemos a la Universidad de Sucre y la Universidad de Córdoba por participar en el desarrollo de este proyecto.

Idioma: Español

1. Introducción

El añublo de la panícula de arroz es una enfermedad que amenaza la producción de cultivos de arroz a nivel mundial, cuyo agente causal es la bacteria *Burkholderia glumae*. Los cultivos de arroz poseen la segunda mayor importancia económica y nutricional en la dieta de las personas después del trigo, por lo tanto, las investigaciones sobre la búsqueda de soluciones a dicha enfermedad han tomado gran relevancia y ha aumentado en los últimos años [1]. Esta enfermedad severamente amenaza la producción de cereales como el arroz, y otros cultivos como el ñame [2]. Las afectaciones generadas a los cultivos son la putrefacción de granos y plántulas, lo que ha venido ocasionando pérdidas mayores al 75 % de la producción en campos severamente afectados [1].

La bacteria *Burkholderia glumae* ha sido identificada en sembrados de arroz de los siguientes países, por mencionar algunos: Colombia [3], Indonesia [4], China [5] y Costa Rica [6]; por tanto, es motivo de diferentes investigaciones para evitar las consecuencias económicas que esta tiene. Según [7], en Colombia en el año 2009 el “fenómeno del Niño” causó un aumento sustancial en las

temperaturas, condición ambiental que fomenta el incremento de la densidad de dicha bacteria al activar genes que sintetizan la toxoflavina, causando vaneamiento del grano [6], lo que contribuyó a la aparición de la misma en Colombia.

Actualmente el control químico es el principal recurso utilizado contra la enfermedad, aunque su uso constante tiene como consecuencia que algunas cepas bacterianas desarrollen resistencia en el cultivo de arroz [8]. Además, la fumigación con químicos trae consigo otras consecuencias indeseadas, tales como el quebranto de la salud de los consumidores de producto cosechado, debido a los altos niveles de toxicidad que introducen estos plaguicidas al ser ingeridos. Por lo anterior es deseable tener una alternativa que cumpla con los requisitos de mantener libre de plagas, pero que además no introduzca los efectos negativos de los insecticidas químicos; es decir, que sea amigable con el medio ambiente, con la salud de los seres humanos y demás seres del ecosistema de las plantaciones [9].

En línea con lo anterior, algunos autores han desarrollado estudios que muestran la acción protectora de ciertos extractos vegetales y de bacterias endófitas sobre la bacteria *Burkholderia glumae*. De acuerdo a [8], las bacterias endófitas extraídas de la planta de arroz, poseen una actividad antimicrobiana que genera una barrera protectora sobre dicha planta, permitiendo que esta no sea afectada por el ataque de la bacteria causante del añublo blanco. Respecto de los extractos vegetales, [10] utilizan el extracto vegetal de la *Melia azedarach* en diferentes concentraciones para evaluar la actividad antibacteriana sobre la bacteria *B. glumae*, observándose que dicha bacteria mostró resistencia ante los diferentes tipos de tratamientos. Por otra parte, la actividad antimicrobiana de las bacterias endófitas obtenidas del árbol de Neem (*Azadirachta indica*) muestran una actividad inhibitoria en el 50 % del crecimiento de la *B. glumae* [11].

El objetivo de esta iniciativa es desarrollar una herramienta de soporte para la toma de decisiones prospectivas, en lo concerniente a posibilidades de inversión en instalaciones fabriles en Colombia, aunado a capacidades, cantidades a producir y vender, y destinos internacionales posibles, de forma que conduzcan a un mejor retorno en utilidades al comercializar internacionalmente bioplaguicidas para cultivos orgánicos. El presente estudio examina dos bioplaguicidas, o productos como genéricamente los denominaremos en este artículo, que se considerarán como alternativas excluyentes para el desarrollo fabril anteriormente mencionado. Tales bioplaguicidas son: producto de origen vegetal, de base vegetal de extracto del árbol de Neem [12] y producto de origen bacteriano, desarrollado de suspensión de bacterias endófitas [2].

Se desarrolló un plan de marketing que identificó cuáles eran los principales ingredientes activos de los plaguicidas químicos utilizados para mitigar los efectos nocivos, las características físicas que debían tener los bioplaguicidas y cuáles eran los mercados internacionales más promisorios para dichos bioplaguicidas. Con esta información se procedió a diseñar un modelo de cadena de suministro para los dos bioplaguicidas examinados, para analizar y contrastar como alternativas de inversión excluyentes en cuanto al tipo de instalaciones fabriles, dada su diferente naturaleza al tratarse de producto de origen vegetal o de origen bacteriano. La consideración excluyente se postula en razón de lograr un mejor aprovechamiento de economías de escala en producción y distribución.

El modelo matemático propuesto incorpora las variables de decisión y características más rele-

vantes de la cadena, tales como cantidades a vender en los mercados nacionales e internacionales, medio de transporte al que se llevarán los mercados y utilidad esperada del proyecto. Se seleccionó el uso de un modelo de programación lineal, el cual muestra las decisiones óptimas para maximizar o minimizar la función objetivo [13]. En este caso, se utiliza un modelo de maximización de utilidades con base en la estimación de la demanda y el precio del bioplaguicida. Mediante las decisiones que el modelo habilita, se logra posicionar el producto, y la empresa podrá contar con un objetivo estimado de utilidades esperadas al acceder a los mercados seleccionados.

Se propone para este trabajo un conjunto diverso de contribuciones que versan desde el orden práctico, pasando por los ámbitos ambiental y sanitario, hasta llegar a lo científico. Desde la perspectiva aplicada, se entrega el diseño de una herramienta prospectiva que conduce la toma de decisiones y minimiza riesgos de inversión bajo entornos de alta incertidumbre, tales como el lanzamiento de nuevas alternativas de bioplaguicidas a nuevos mercados. Es de destacar que esclarece vías concretas para la apertura de nuevos mercados de exportación para el país, lo que conlleva a aportes de alto valor agregado de manufactura al PIB colombiano.

Desde la perspectiva de lo ambiental, se habilita el desarrollo sostenible de los cultivos orgánicos en el contexto nacional e internacional, mediante el establecimiento de propuestas de ganancias máximas para la producción y distribución internacional de productos bioplaguicidas. No menos importante, se tiene un claro aporte dirigido hacia la disminución de riesgos potenciales de intoxicación por consumo humano de remanentes químicos en cultivos vegetales que han sido tratados con plaguicidas químicos convencionales.

En cuanto a las contribuciones científicas, para su identificación se toma como referencia una estrategia semántica presentada por [14], que es utilizada para la reivindicación de contribuciones científicas. [14] proponen que las contribuciones son el núcleo de las investigaciones científicas, porque cada una de ellas proporciona utilidad o valor, en diferente magnitud, a al menos una audiencia cuyo conocimiento se expande al considerar un argumento o los hallazgos de un estudio. Dicha estrategia semántica se basa en la categorización de las contribuciones, articuladas en cuatro categorías principales: incremental, reveladora, replicativa y consolidadora, cada una incluyendo además subcategorías específicas¹.

Teniendo en cuenta la clasificación anterior, se presentan como contribuciones científicas de este artículo: la aplicación de técnicas conocidas de optimización lineal para maximización de utilidades en un nuevo contexto de aplicación sobre productos bioplaguicidas no existentes, para proyectar decisiones de inversión y sostenibilidad bajo incertidumbre en el largo plazo (categoría: incremental, subcategoría: nuevo contexto); adicionalmente, tales modelos de optimización se usan complementariamente con otras técnicas econométricas, tales como pronósticos y regresiones para proporcionar parámetros de entrada a dichos modelos de optimización, en cuanto a proyecciones de demanda y precios de mercado (categoría: replicativa, subcategoría: replicación cercana).

El presente documento se encuentra estructurado de la siguiente manera: se desarrolla una revi-

¹Para más información sobre las categorías y subcategorías de clasificación de las contribuciones científicas, el lector debe remitirse a [14].

sión literaria en la que se exponen investigaciones sobre modelación de cadenas de suministro por medio de múltiples técnicas de programación matemática. Posteriormente se desarrolla la modelación de parámetros en la que se detalla la manera como fueron estimados los precios y las demandas de los productos tanto de origen vegetal como bacteriano. Luego se describen los componentes del modelo. Con la información anterior se procede con pruebas numéricas para análisis de los resultados obtenidos. Finalmente se plantean criterios de decisión bajo un examen de múltiples escenarios sobre los cuales se discuten las mejores opciones de inversión en capacidad y de comercialización de los bioplaguicidas. Por último, se resumen las conclusiones obtenidas de la investigación.

2. Revisión literaria

La modelación de una cadena de suministro permite la planificación de la producción y el transporte mediante el logro de un objetivo en específico, como por ejemplo, la maximización de beneficios o disminución de costos [13]. Existen diferentes técnicas de modelación por medio de algoritmos matemáticos: programación lineal entera y mixta, programación no lineal, programación no lineal entera, programación multiobjetivo con restricciones no lineales, programación matemática difusa, programación estocástica y modelos híbridos lineales apoyados por simulación [13]. Al revisar la literatura se encontraron diversas investigaciones enfocadas en la utilización de modelos para la planificación y ejecución de una cadena de suministro.

En [15], los autores diseñan un modelo que integra tanto la planificación de la producción como la distribución para una multinacional en el sector químico. El modelo consta de varias plantas, múltiples periodos y múltiples productos. La estructura de la cadena es tipo red con un nivel de decisión táctico y cuyo objetivo es maximizar los beneficios. El modelo incorpora información referente a estructura de producto, costo de fabricación, costos de transporte, costos de subcontratación, ingresos por ventas, costos de inventario, capacidad de transporte, capacidad de almacenamiento, capacidad de aprovisionamiento y demanda.

Otros autores [16] evalúan dos escenarios, centralizados y descentralizados, en un entorno de planificación de transporte y producción. El modelo tiene como objetivo maximizar los beneficios, sus características principales son: un nivel de decisión táctico y de tipo red. El modelo se alimenta con la información de los costos de fabricación, transporte e inventario. Adicionalmente con información de capacidad de almacenamiento y demanda.

En la revisión de literatura se tuvieron en cuenta los siguientes criterios: año de publicación, objetivos, alcance internacional, producto químico, orgánico y biológico, y plaguicida. Respecto del período de publicación, se incluyeron investigaciones publicadas desde el año 1989 hasta febrero de 2019. Se identificó si el estudio revisado se desarrolló con la finalidad de maximizar utilidad o minimizar costos. También si los costos del comercio internacional se tuvieron en cuenta en el desarrollo del modelo estudiado. Adicionalmente, se determinó si el producto transado poseía una composición de tipo química, orgánica o biológica, y si específicamente se trataba de un plaguicida.

Se percibió que el 30 % de los trabajos tiene como objetivo maximizar las utilidades de los modelos de la cadena de suministro, el 70 % restante se concentra en la minimización de los costos.

Respecto al comercio internacional, el 20 % de las investigaciones incorporan los costos asociados al comercio entre países. En la composición del producto, el 12 % de los estudios muestra que los modelos de cadenas de suministros fueron desarrollados a productos que forman parte al sector químico. En el resto de investigaciones no se identificó productos con algún tipo de composición orgánica o biológica. Así mismo, en los estudios revisados no se encontró ninguno que estuviese relacionado con el diseño de una cadena de suministro para productos plaguicidas.

3. Modelación de parámetros

3.1. Precio

El control químico es el único método utilizado contra la enfermedad, aunque el uso prolongado de este tiene como efecto que la bacteria pueda desarrollar resistencia en el cultivo de arroz [8]. Del mismo modo, se han practicado pruebas en laboratorio con el uso de ingredientes activos químicos como validacimina A, kasugamicina, óxido cúprico, oxitetraciclina, sulfato de cobre, ácido oxolínico y ácido hipocloroso, en que se demostró que no tenían efectos sobre el control de la bacteria *Burkholderia glumae* [17].

Al ser el control químico la opción tradicional y prácticamente exclusiva para contrarrestar la enfermedad, se opta por identificar qué plaguicidas en el mercado contienen los ingredientes activos antes mencionados, con el propósito de usar como producto sustituto de referencia. En la búsqueda se logra identificar dos productos con un ingrediente activo diferente: validacimina A y oxitetraciclina. La validacimina A como ingrediente activo es empleada, comúnmente, para controlar plagas de tipo fúngicas en la agricultura. La oxitetraciclina es un ingrediente activo empleado para el control de diferentes tipos de bacterias en los cultivos. Con la identificación de los agroquímicos se procedió a registrar los precios en el mercado de estos. Los precios de los agroquímicos fueron tomados de los boletines mensuales de insumos y factores asociados a la producción agropecuaria y publicados por el Departamento Nacional de Estadística en Colombia (DANE) [18]. Para el periodo comprendido entre el año 2012 y 2017, se desarrolló una media con los precios de los diferentes lugares que describen los boletines en el mes de diciembre. Respecto al año 2018, la media fue calculada con base en el boletín del mes de julio.

Teniendo en cuenta la diferencia existente entre la tendencia de los precios, se selecciona el precio del agroquímico a base de validacin como precio de referencia del mercado, debido a que este producto muestra una tendencia decreciente en el precio. Además, desde el año 2014 en adelante el agroquímico a base de validacin presentó un precio menor al del agroquímico a base oxitetraciclina. Por otra parte, considerando como parámetro mínimo mantener un margen de ganancia deseado del 10 % con respecto a los costos totales de producción, se propone una formulación para los precios contemplando tres posibles variantes para los diez periodos: como primera medida se propone manejar un precio introductorio por debajo del precio del agroquímico a base de validacin durante los tres primeros años, contemplando un margen del 20 % por debajo del precio promedio del mercado de ambos productos de referencia.

Seguidamente se propone diversificar el precio en tres escenarios (series de tiempo) para los res-

tantes años de la ventana de tiempo modelada: uno pesimista, uno base y uno optimista. El escenario pesimista se define con una tendencia del 20 % de margen por debajo del precio del agroquímico a base de validación. Para el escenario base se define la tendencia creciente del precio del agroquímico seleccionado. Y, por último, para el escenario denominado como optimista se propone fijar un margen del 10 % por encima del precio del validación.

3.2. Demanda

En el análisis de la demanda internacional se seleccionaron de manera preliminar cuatro países. En la elección de los tres primeros países se tuvieron en cuenta aquellos que fuesen los mayores productores de arroz en el mes de diciembre de 2018. Estos países son China, India e Indonesia [19]. En la elección del cuarto país se toma a aquel que fuese el mayor exportador de arroz registrado en el mes de diciembre de 2018, como India es el mayor exportador y fue seleccionado en el primer criterio, se decide optar por el segundo, que es Tailandia [20].

Luego de la elección preliminar, los países pasan por un segundo filtro, que consiste en identificar el número de hectáreas cultivadas con arroz de tipo orgánico, como medida que permite aproximar la aceptación por los productos de tipo biológico. Se observa que los países reportaron las siguientes cantidades de hectáreas cultivadas con arroz orgánico: China, 275.839,58; Indonesia, 1.401,32; Tailandia, 32.773,92, e India no reportó ninguna hectárea cultivada.

Con la elección de los mercados internacionales, se procede a analizar la demanda de la cantidad de bioplaguicida que será destinado a cada uno. Por ser plaguicidas de origen biológico, se decide estimar la demanda por medio del número de hectáreas de arroz orgánico que tiene cada país. Los datos sobre el arroz orgánico fueron tomados del Research Institute of Organic Agriculture (FiBL) [20], el cual se tomó en forma exclusiva, considerando el consumo potencial de arroz orgánico. Para los efectos de estimar la demanda de los bioplaguicidas, se tomó como base el 10 % del número de hectáreas cultivables de cada país proyectadas como mercado objetivo factible de acceder anualmente; seguidamente, el consumo de cada variedad de producto se obtuvo sobre la base de consumo de bioplaguicida por hectárea cultivada en forma anual.

4. Modelo general

A continuación, se detalla el proceso de producción, logística y distribución de los bioplaguicidas, en este caso se considerará el mismo esquema de cadena de suministro para ambos bioplaguicidas. Es importante detallar que hasta el momento se propone la apertura de una única instalación de producción y ensamble. A su vez, el modelo está habilitado para escoger la opción de transporte más conveniente para el transporte nacional y el transporte internacional, aun cuando se anticipa la selección de transporte carretero y marítimo, respectivamente.

Como supuesto importante, se considera que dicha instalación de producción desarrollará en forma exclusiva un solo producto, sea el bioplaguicida de base vegetal o la solución de bacterias endófitas, pero no ambos. Esto, dado que en términos industriales las ventajas por economías de escala

y curva de aprendizaje favorecen la especialización de instalaciones y procesos a un solo producto. Así, se desarrolla la modelación de cadenas de suministro internacionales en la que cada bioplaguicida se diferenciará en costos y tasa de producción con base en la información suministrada por el equipo desarrollador.

4.1. Supuestos del modelo

- I Las empresas proveedoras tienen capacidad suficiente para suplir los requerimientos de la demanda.
- II Los costos fueron producto de consultas sobre la oferta de proveedores y transportistas.
- III La capacidad de producción de la planta para el producto vegetal es de 20 litros cada tres horas y eso equivale al uso de 50 kg de Neem (materia prima).
- IV La capacidad de producción de la planta para el bioplaguicida de origen bacteriano es de cien litros diarios.
- V Dependiendo el tipo de escenario, se harán incrementos de capacidad cada tres periodos, por lo cual se considera una inversión cada tres años en capacidad del 5 %.
- VI Se considera un incremento de costos fijos en instalaciones con cada incremento de capacidad instalada en el tiempo.
- VII La demanda nacional está basada en la captación del 5 % del mercado total, incrementado anualmente. Sin embargo, se emplearán diferentes escenarios para evaluación prospectiva.
- VIII La demanda internacional está enfocada en pronósticos de producción de hectáreas de arroz en tres países seleccionados en el plan de marketing internacional, la captación del mercado comienza con el 10 % de hectáreas cultivadas en cada país.

4.2. Formulación matemática

4.2.1. Índices

- i : # de mercados nacionales e internacionales (por países y sectores nacionales)
 j : # de medios de transporte a utilizar (transporte terrestre y marítimo)
 t : # de periodos a analizar

4.2.2. Variables

- X_{ijt} : número de unidades a suplir al mercado i a ser transportados por el medio j en el periodo t .
 I_{it} : número de unidades a mantener en inventario para el mercado i durante el periodo t .
 B_{it} : número de unidades faltantes para el mercado i durante el periodo t .
 U_t : utilidad esperada en el periodo t .
 C_t : costos esperados en el periodo t (producción y transporte, inventario y faltantes).
 I_t : ingresos esperados en el periodo t .

4.2.3. Constantes asociadas a variables

CM_{ijt} : costos de operación (producción y transporte) de unidades demandadas por el mercado i a ser transportados por el medio j durante el periodo t .

PV_{ijt} : precio de venta por unidad para mercado i a ser transportada por el medio j en el periodo t .

D_{it} : demanda de unidades del mercado i a suplir en el periodo t .

CI_t : costo de mantener en inventario unidades durante el periodo t .

CB_{it} : costo por unidad por incumplir demanda del mercado i en el periodo t .

Cap_t : capacidad de la planta por periodo t .

4.2.4. Función objetivo

$$Z(MAX) = \text{Ingresos} - \text{Costos}$$

Ingresos:

Por la venta de unidades a mercados nacionales e internacionales

$$\sum_{i=1}^{\text{mercados}} \sum_{j=1}^{\text{transporte}} \sum_{t=1}^{\text{periodo}} PV_{ijt} X_{ijt} \quad (1)$$

Costos:

Costo operación (producción y transporte):

$$\sum_{i=1}^{\text{mercados}} \sum_{j=1}^{\text{transporte}} \sum_{t=1}^{\text{periodo}} CM_{ijt} X_{ijt} \quad (2)$$

Costo - Inventarios

$$\sum_{i=1}^{\text{mercados}} \sum_{t=1}^{\text{transporte}} CI_t I_{it} \quad (3)$$

La función objetivo está basada en la maximización de utilidades, la cual se basa a su vez en los ingresos por venta del producto a nivel nacional e internacional (1) menos los costos totales, los cuales son: (2) costos de operación que incluyen producción y transporte, y (3) costo de mantener inventario. Es importante destacar que se utilizan dos modelos diferentes para cada tipo de producto (vegetal y bacteriano), teniendo en cuenta que la decisión sobre inversión, operación y comercialización del uno sobre el otro es excluyente, y que los objetivos del plan de marketing y logística de la empresa productora incluyen evaluar dichas oportunidades de inversión.

4.2.5. Restricciones

Sujeto a:

Capacidad de planta

$$\sum_{i=1}^{\text{mercado}} X_{ijt} \leq Cap_t \quad (4)$$

Para todo j, t .

La restricción (4) está asociada a la capacidad de la planta, la cual indica que el número de productos a fabricar no puede exceder la capacidad de producción de la planta. Dicha capacidad es fija para cada tipo de producto (vegetal y bacteriano).

Balace de inventario planta

$$I_{it} - B_{it} = I_{i(t-1)} + \sum_{i=1}^{\text{transporte}} X_{ijt} - B_{i(t-1)} - D_{it} \quad (5)$$

Para todo i, t .

La restricción asociada al balance de inventario en planta (5) restringe el número de productos a fabricar por periodo para cada mercado, el cual depende de la cantidad de inventario, los faltantes la demanda en cada periodo por mercado.

Inventario inicial

$$I_{i0} = 0 \quad (6)$$

Cantidad de producto

$$X_{ijt} \geq 0 \quad (7)$$

Para todo i, j, t .

La restricción (6) indica que el inventario inicial en el primer periodo es igual a cero. La restricción (7) indica que la cantidad de producto a fabricar en cada periodo tiene que ser mayor o igual a cero y además entera.

5. Análisis de resultados

Para el análisis de resultados se tiene en cuenta la generación de trece escenarios prospectivos, que reúnen diferentes combinaciones factibles de los parámetros de precio, demanda y capacidad de producción, los cuales son detallados en la Tabla I y subsecuentemente explicados en esta sección. Para los parámetros precio y demanda se tiene en cuenta tres tipos de escenarios: pesimista, optimista y base, y para la capacidad de producción dos tipos de escenarios: constante o creciente.

Es importante destacar que de todas las combinaciones posibles se toman en cuenta solo las que son lógicamente factibles. Por ejemplo, combinaciones como precio y demanda pesimista y capacidad de producción creciente no se contemplan, ya que, si el precio y la demanda son pesimistas, no se justifica una inversión para aumentar la capacidad de producción. El detalle de cada escenario, tanto para el precio como para la demanda, se encuentra en la sección 3.

Es importante destacar que, para la evaluación de los escenarios referentes al producto de origen vegetal, se usará como nomenclatura la letra (S) delante del número de identificación de los escenarios, y para el caso de los escenarios asociados al producto compuesto de suspensión de bacterias

Tabla I. Escenarios por producto

Escenarios	Precio	Demanda	Capacidad de producción
1	pesimista	base	constante
2	base	base	creciente
3	base	base	constante
4	optimista	base	constante
5	optimista	base	creciente
6	pesimista	optimista	constante
7	base	optimista	constante
8	base	optimista	creciente
9	optimista	optimista	creciente
10	optimista	optimista	constante
11	pesimista	pesimista	constante
12	base	pesimista	constante
13	optimista	pesimista	constante

endófitas se usará la letra (B).

A continuación, la Figura 1 muestra en detalle la utilidad de cada escenario del producto de origen vegetal en cada uno de los periodos.

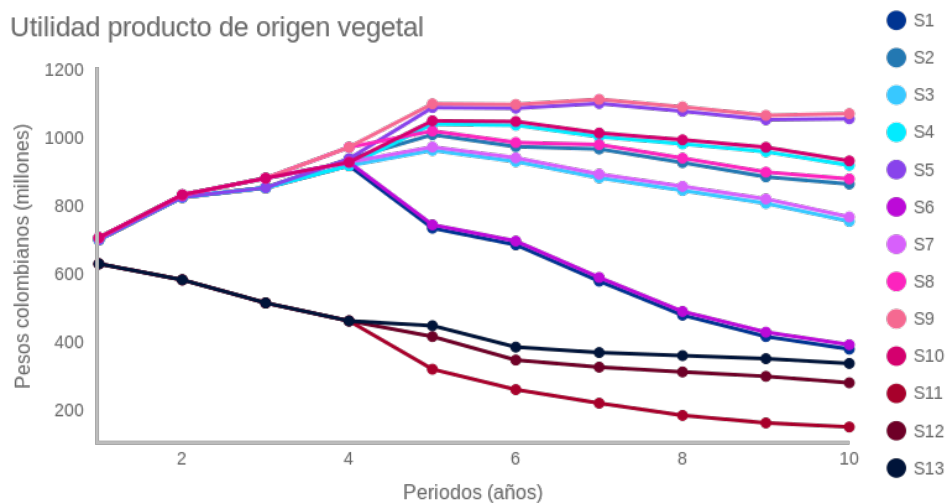


Figura 1. Utilidad producto de origen vegetal

Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta cada uno de los trece escenarios expuestos anteriormente y con base en los ingresos y costos de estos, se puede afirmar que el mejor escenario sería el escenario S9, en cuanto a que tiene las mejores condiciones de precio, demanda y capacidad. De la misma manera, el peor escenario es el S11, el cual maneja una tendencia de precios pesimista, una demanda pesimista y una capacidad de producción constante. Al analizar cada escenario se pueden obtener conclusiones como:

- La capacidad de la planta siempre está por debajo de la demanda, tanto nacional como internacional. El modelo prefiere suplir primero el mercado nacional debido a los costos totales, ya que estos son menores que para el caso del mercado internacional y maximiza la utilidad.
- El mercado internacional más atractivo es China, mercado que como supuesto de demanda solo se le tomó un 10 % de la demanda total actual. Esto significa que en el caso de un aumento de capacidad de producción y una estrategia de captación de mercado internacional, siempre sería más rentable enviar a China y tratar de aumentar el margen de demanda. De hecho, su amplia porción de demanda es tal que en escenarios optimistas bien podría absorber por sí misma toda la capacidad instalada.
- Es importante destacar que aun en el peor escenario en el cual la demanda decae, el precio decae y la capacidad de producción es constante, se puede tener un margen de utilidad positivo.
- Cuando la demanda es pesimista en los escenarios S11, S12 y S13 se reportan las utilidades más bajas acompañadas con un comportamiento decreciente. Por otro lado, cuando las condiciones son de precio pesimista junto a una demanda constante, las utilidades crecen hasta el cuarto año, y después empiezan a decaer, debido a que no se pueden captar más demanda por la falta de capacidad y el precio no permite obtener utilidades que promuevan el crecimiento de la empresa. Bajo estos escenarios no se contempla crecimiento de la inversión en capacidad.
- En los escenarios S9 y S5, al ser el precio optimista y contar con una estrategia de capacidad instalada creciente, las utilidades son altas, logrando valores por encima de \$1.100.000.000 COP. La capacidad instalada creciente permite absorber una porción mayor de la demanda, y al estar acompañado de un precio optimista, se obtiene una utilidad que permite el crecimiento de la empresa.

De igual manera que para el producto de origen vegetal se graficaron las utilidades de cada escenario por periodo del producto de origen bacteriano (ver Figura 2), como se expuso anteriormente, para su identificación cada escenario tendrá la letra B delante del número asociado a cada escenario.

A continuación, se analizan los escenarios que fueron simulados para el producto basado en suspensión de bacterias endófitas. La Figura 2 muestra que los escenarios donde se obtuvieron las mayores utilidades fueron el B9 y el B5, en los que las utilidades recibidas al finalizar los diez años son superiores a los \$700.000.000. Lo anterior se debe a que las condiciones de la demanda y la capacidad instalada son crecientes. Respecto a los peores escenarios, se identificaron los escenarios B6, B11 y B12. En estos escenarios las condiciones fueron pesimistas, lo que contribuyó a que la

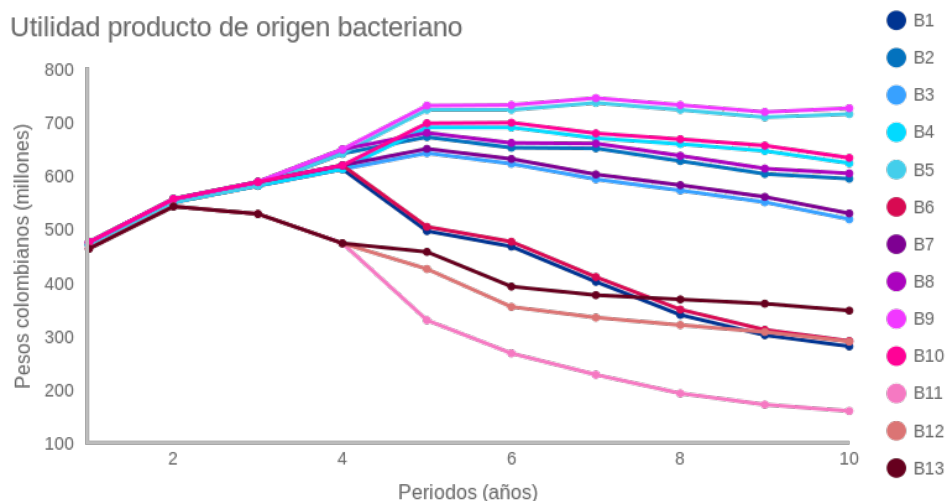


Figura 2. Utilidad producto de origen bacteriano

Fuente: elaboración propia

utilidad tuviese un comportamiento decreciente en el tiempo.

En el escenario B11 la utilidad en el décimo año fue de \$156.000.000. Para los escenarios B6 y B12, las utilidades se mantuvieron por encima de los \$240.000.000. Luego de analizar cada escenario, se concluye de la siguiente manera:

- El modelo muestra que las ventas a nivel nacional son más atractivas que las ventas en el exterior. En los escenarios con condiciones optimistas las ventas nacionales duplican a las ventas proyectadas en China, siendo el país asiático en donde más unidades de bioplaguicidas de origen bacteriano se venden. Así mismo, en aquellos escenarios donde las condiciones son pesimistas se observa que las ventas nacionales son hasta seis veces más grandes que en China. Esto se debe a que los costos nacionales son menores a los internacionales.
- En caso de aumentar la cuota de mercado en el exterior, se recomienda aumentar la capacidad de producción para enviar más unidades de bioplaguicidas a China, debido a que es la nación donde se obtiene el segundo mayor volumen de ventas a lo largo del tiempo.
- Al igual que en los escenarios evaluados con el bioplaguicida de origen vegetal, se observa que las utilidades se mantienen positivas en los escenarios analizados para el bioplaguicidas de origen bacteriano.
- Cuando se proyecta una estrategia de precio optimista se observa que las utilidades mantienen un comportamiento creciente en el tiempo. En contraste, cuando se considera una estrategia

de precio base se observa que las utilidades crecen hasta el quinto año y luego permanecen constantes. Por último, ante una estrategia de precio pesimista las utilidades crecen hasta el segundo año y luego empiezan a decaer. Al combinar las estrategias de precios optimistas con la condición de demanda optimista, las utilidades crecen sustancialmente. En cambio, cuando se mezclan las condiciones de demanda constante o decreciente las utilidades decrecen rápidamente.

- La estrategia de capacidad instalada creciente genera un aumento significativo en los ingresos, dado que los ingresos al final del último año son superiores a los \$1.100.000.000. Así mismo, el aumento de los costos muestra ser superior a los \$500.000.000. Por lo tanto, las utilidades para los escenarios con capacidad instalada creciente son mayores a los \$600.000.000.

5.1. Análisis de resultados comparativos

A continuación, se procede a realizar un análisis del mejor y el peor escenario de ambos productos, para así tomar una decisión de fabricación y exposición de los productos. La Figura 3 muestra el mejor escenario en ambos casos para una ventana de tiempo de diez años, con parámetros de precio creciente, demanda optimista y capacidad de producción creciente; para el producto de origen vegetal tiene como nomenclatura de identificación (S9) y para el caso de la suspensión de bacterias endófitas (B9).

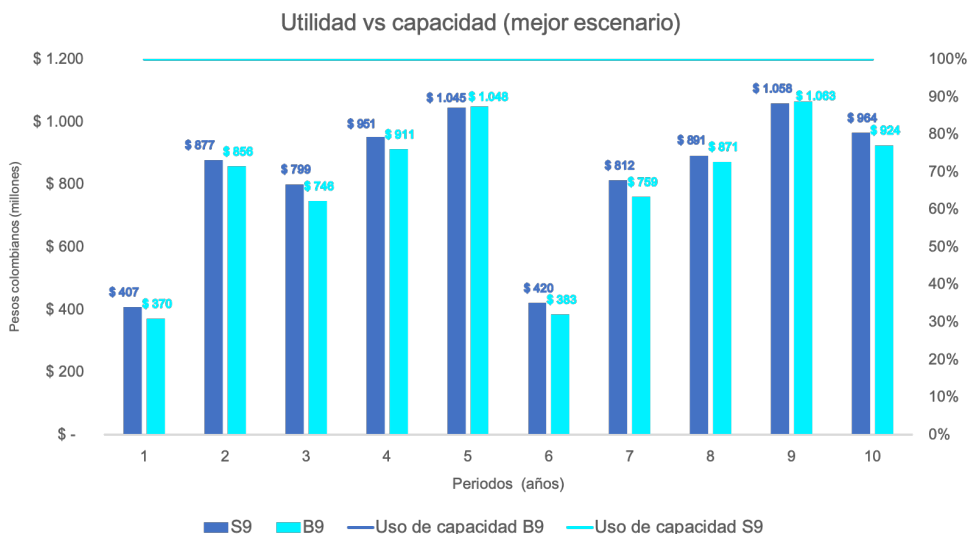


Figura 3. Utilidad vs Capacidad (mejor escenario)

Fuente: elaboración propia

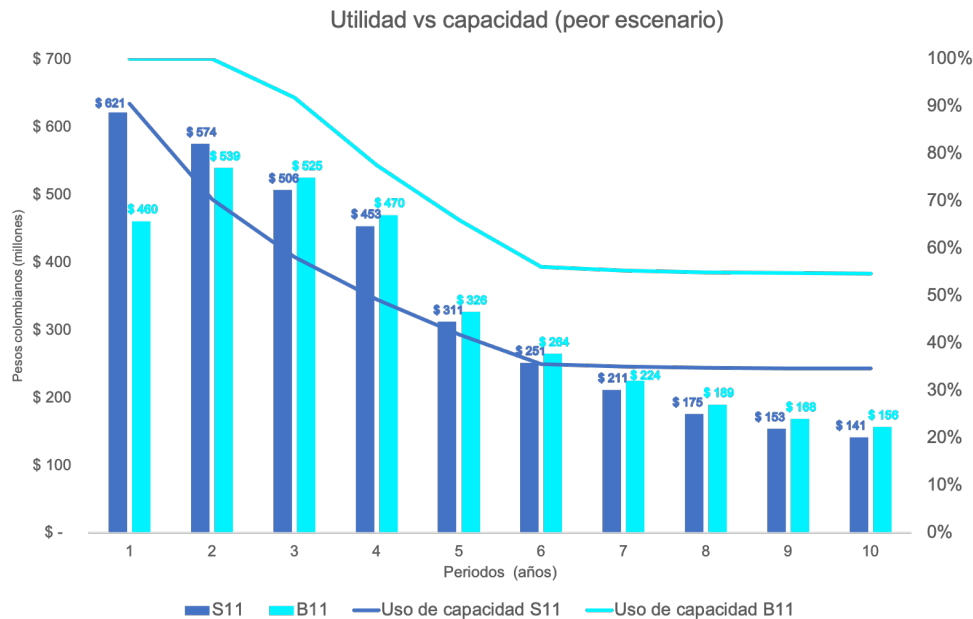


Figura 4. Utilidad vs Capacidad (peor escenario)

Fuente: elaboración propia

Como primera medida se observa que el uso de capacidad para todos los periodos tanto del producto de origen vegetal como del de origen bacteriano es del 100%. Esto indica que, para ambos casos, la suma de las demandas, nacional e internacional, está por encima de la capacidad de la planta. Sin embargo, existe una diferencia al analizar las utilidades por periodo de cada escenario para cada producto.

La Figura 3 ilustra con un diagrama de barras la utilidad en cada periodo; en ella se observa que estas son significativamente mayores para el producto vegetal (S9), debido netamente a la mayor capacidad de producción de este último, la cual siempre es aproximadamente 40% mayor que para el producto de origen bacteriano.

Teniendo en cuenta los resultados comparativos de ambos productos, se propone como recomendación o estrategia enfocarse en la fabricación exclusiva del bioplaguicida de origen vegetal, aunque los costos sean mayores que para el caso del producto compuesto de solución de bacterias endófitas. Esto debido a que el margen de utilidad es más significativo y se puede llegar a la captación de más mercado, tanto nacional como internacional.

Considerando ahora el caso del peor escenario de ambos productos, la Figura 4 presenta precios y demandas con tendencias pesimistas y capacidad de producción constante a lo largo de los diez

periodos de estudios (S11) para el producto de origen vegetal y (B11) para el producto de origen bacteriano); se puede observar como primera medida la tendencia decreciente del uso de capacidad.

Para el caso del producto de origen vegetal (S11), el porcentaje de uso de la capacidad decrece a partir del primer periodo y se logra estabilizar desde el sexto periodo en adelante; sin embargo, es significativamente más baja que para el caso del producto de origen bacteriano (B11). En cuanto a la utilidad, solo en los dos primeros periodos el producto de origen vegetal logra tener mayor rentabilidad, y a partir del tercer periodo el producto de origen bacteriano logra ser más rentable.

No obstante, debido a las condiciones del mercado y el supuesto de captación del 5 % al 10 % de la demanda nacional y de China, es muy poco probable que este escenario ocurra. Y aun si ocurriese, para ambos bioplaguicidas la rentabilidad es positiva. Es de notarse que en un escenario adverso como el descrito es más favorable la decisión de manufacturar el producto de origen bacteriano, dado que produce más ingresos con una inversión menor y, por tanto, con un menor riesgo de inversión.

6. Conclusión

Burkholderia glumae es la bacteria causante de una enfermedad que amenaza la producción de cultivos de arroz a nivel mundial, por lo que en el transcurso de los años se han buscado diferentes alternativas de solución para combatir la enfermedad. Actualmente, el control químico es el más usado para prevenir y eliminar esta enfermedad en los cultivos, aunque este recurso presenta efectos secundarios en la salud de los seres humanos.

Debido a esto se han desarrollado diferentes estudios enfocados en el uso de extractos vegetales y bacterias endófitas para combatir dicha enfermedad sin generar daños en la salud de los consumidores de arroz. A pesar de ello, la comercialización de estos no está muy avanzada. Es por esto que el presente estudio busca crear oportunidades de apertura de mercados para dichos productos, con el fin de mejorar las producciones de arroz tanto nacional como internacional con alternativas de pesticidas biológicos (que con su consumo no sean perjudiciales a la salud). A su vez, se buscó dar soporte a la creación de pequeñas empresas en mercados emergentes.

Mediante esta investigación se propuso impulsar y facilitar la entrada al mercado nacional e internacional de dos bioplaguicidas, uno de origen vegetal y otro de origen bacteriano, que protegen cultivos de arroz contra el añublo blanco de la panícula de arroz. Para ello, este estudio desarrolló como primera medida pronósticos de las demandas de los productos, tanto a nivel nacional como internacional. A su vez, se desarrolló un modelo que permite facilitar la fabricación y la distribución de los productos mediante la creación detallada de su cadena de suministro. Teniendo en cuenta lo anterior, se obtuvieron dos tipos de resultados con base a cada producto, descritos a continuación.

Para el caso del bioplaguicida de origen vegetal, los resultados señalan que la capacidad de planta siempre se encuentra por debajo de la demanda nacional e internacional. Sin embargo, la decisión de suplir dichas demandas varía en el tiempo. Se destaca además que la decisión de suplir mercados prioriza al mercado nacional, esto es debido a la influencia de los costos totales en la decisión final;

destacando que los costos totales asociados a suplir la demanda de dicho producto son menores a nivel nacional que a nivel internacional (China, Tailandia e Indonesia).

A nivel internacional el modelo muestra que el mercado de China es el más atractivo; es por ello que, si el productor se decide a aumentar su cuota de mercado, el modelo propone enviar más unidades de producto vegetal a China. Respecto a Tailandia e Indonesia, se observó que cuando la demanda es pesimista, el modelo intenta suplir las demandas de estos; sin embargo, cuando el horizonte de tiempo pasa los seis años, el modelo no envía más unidades a este mercado y prefiere mantenerse en el mercado de China y satisfacer una pequeña proporción del mercado de Indonesia.

Respecto al bioplaguicida compuesto de suspensión de bacterias endófitas, se obtienen resultados similares a los del bioplaguicida de origen vegetal, aunque en una escala menor. El modelo prefiere satisfacer la demanda del mercado nacional y parte del mercado internacional. A nivel internacional, el mercado de China se mantiene como el más interesante, aunque en los escenarios de demanda pesimistas, el modelo prefiere suplir al mercado de Tailandia hasta alcanzar un horizonte de tiempo de cinco años. A partir de este momento, las unidades vendidas en Tailandia son iguales a las vendidas en China. Es importante destacar que en todos los escenarios del producto bacteriano las utilidades son positivas (al igual que para el bioplaguicida de origen vegetal).

A su vez, se hizo un análisis de los dos mejores y peores escenarios para cada producto. En el caso de los dos mejores escenarios para cada producto se observó que las utilidades para una década del producto de origen vegetal son, en promedio, 30 % mayores a las del bioplaguicida basado en suspensión de bacterias endófitas. Bajo escenarios en que la restricción de mercado es capacidad, la mayor utilidad se recibe del producto con mayor capacidad instalada. En el caso de los escenarios pesimistas se percibió que las utilidades del bioplaguicida de origen bacteriano son un 5 % mayores a las del bioplaguicida de origen vegetal para el mismo periodo de tiempo.

Por lo anterior se recomienda enfocarse en la fabricación de un solo producto, en este caso el de origen vegetal, debido a que se logra obtener una mayor captación de utilidad respecto al producto de origen bacteriano en los escenarios mencionados. Adicionalmente, es recomendable tomar una estrategia de capacidad creciente, porque permite el aumento de la cuota de mercado y se reciben más utilidades en el tiempo respecto a la estrategia de mantener la capacidad constante.

Del análisis de los productos y escenarios considerados se desprende, más que una determinación, una heurística que permite tomar las mejores decisiones considerando la concreción de los escenarios representados en el tiempo. Por lo tanto, puede tomarse como una buena decisión enfocarse en la fabricación del bioplaguicida basado en bacterias endófitas, dada su menor inversión y consecuente menor exposición al riesgo. Del mismo modo, en algunos escenarios puede captarse un mejor nivel de utilidades que en el de origen vegetal. Así, la toma de decisiones correspondiente debe ser vista bajo un análisis prospectivo de los escenarios más probables y las apuestas, más reacias o propensas al riesgo, de los inversores del proyecto.

De este trabajo se desprenden diversas contribuciones. Como contribuciones prácticas, en primera medida, provee una herramienta prospectiva que conduce la toma de decisiones y minimiza riesgos de inversión para nuevos emprendimientos en bioplaguicidas dirigidos a nuevos merca-

dos. Adicionalmente, viabiliza aportes de alto valor agregado de manufactura al PIB colombiano, contribuyendo al desarrollo sostenible de los cultivos orgánicos mediante el establecimiento de propuestas de ganancias máximas para la producción y la distribución internacional de productos bioplaguicidas, y se aporta sanitariamente a la disminución de intoxicaciones por consumo de remanentes de plaguicidas químicos en cultivos vegetales.

Como contribución científica de este artículo se destaca el enriquecimiento de la literatura desarrollada sobre los modelos de cadena de suministro respecto a los bioplaguicidas de uso agrícola. Más específicamente, la aplicación de técnicas de optimización lineal para maximización de utilidades en emprendimientos de productos bioplaguicidas para decisiones de inversión y sostenibilidad en el largo plazo constituye una contribución incremental en el sentido en que añade nueva literatura relevante. Se puede hacer mención del uso innovador y complementario de modelos de optimización junto con pronósticos y regresiones, para de esta forma extender el alcance y la precisión de los resultados en cuanto a proyecciones de demanda y precios de mercado.

Se espera que futuras investigaciones continúen impulsando el desarrollo de cadenas de suministro de nuevos bioplaguicidas. Así mismo, se proponen como investigaciones futuras nuevos diseños que contengan modelos integrales, en los que se puedan analizar más detalladamente funciones financieras en las que se incluyan costos de envío, teniendo en cuenta diferentes tipos de incoterms, transporte multimodal —incluyendo el análisis de huella de carbono—, pronósticos sobre la demanda con diferentes tipos de técnicas econométricas, y modelos multiobjetivo que permitan evaluar, además de la utilidad del producto, el precio y las fluctuaciones del mismo dependiendo del tipo de mercado, la localización de la plantas de producción, así como el número adecuado de estas dentro del país. Para finalizar, es importante destacar que las futuras líneas de investigación mencionadas están enfocadas en modelos que incluyan tanto factores tecnológicos como ambientales, para así lograr que los nuevos productos tengan mayor visibilidad y aceptación en los diferentes mercados del mundo.

References

- [1] L. Gañán, “Manejo integrado del añublo bacterial de la panícula del arroz (*Oryza sativa* L.) causado por *Burkholderia glumae* (Kurita & Tabei): una revisión”, *Agronomía*, vol. 19, no. 2, pp. 79-90, 2011. [http://agronomia.ucaldas.edu.co/downloads/Agronomia19\(2\)_8.pdf](http://agronomia.ucaldas.edu.co/downloads/Agronomia19(2)_8.pdf) ↑124
- [2] P. Doncel y A. Pérez-Cordero, “*Burkholderia cepacia* aisladas de variedades de ñame con actividad antimicrobiana contra *Colletotrichum gloeosporioides*”, *Rev. Colombiana Cienc. Anim.*, vol. 9, no. S1, pp. 31-38, 2017. <https://doi.org/10.24188/recia.v9.nS.2017.518> ↑124, 125
- [3] N. Flórez y D. Uribe, “Determinación de la infección de *Burkholderia glumae* en semillas de variedades comerciales colombianas de arroz”, *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*, vol. 64, no. 2, pp. 6093-6104, 2011. doi: 10.15446/rfnam ↑124
- [4] M. Handiyanti, S. Subandiyah, and T. Joko, “Deteksi Molekuler *Burkholderia glumae*, Penyebab Penyakit Hawar Malai Padi”, *J. Perlindungan Tanam. Indones.*, vol. 22, no. 1, pp. 98-107, 2018. <https://doi.org/10.22146/jpti.30259> ↑124
- [5] C. Zhou-qi, Z. Bo, X. Guan-lin, L. Bin, and H. Shi-wen, “Research Status and Prospect of *Burkholderia glumae*, the Pathogen Causing Bacterial Panicle Blight”, *Rise Science*, vol. 23, no. 3, pp. 111-118, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2016.01.007> ↑124
- [6] A. Quesada y F. García, “*Burkholderia glumae* en el cultivo de arroz en Costa Agron. Mesoam., vol. 25, no. 2, pp. 371-381, 2014. <http://dx.doi.org/10.15517/am.v25i2.15452> ↑124, 125

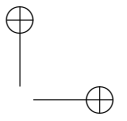
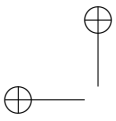
- [7] A. Cuevas, "El clima y el cultivo de arroz en Norte de Santander", *Rev. Arroz*, vol. 60, no. 497, pp. 4-17, 2012. ↑ [124](#)
- [8] M. Peláez y S. Vivas, "Resistencia inducida a la enfermedad del añublo de la panícula del arroz inoculando bacterias endofíticas", *Rev. Investig. Agrar. y Ambient.*, vol. 8, no. 2, pp. 51-59, 2017. <https://doi.org/10.22490/21456453.2030> ↑ [125](#), [128](#)
- [9] M. B. Isman, "Botanical Insecticides, Deterrents, and Repellents in Modern Agriculture and an Increasingly Regulated World", *Annu. Rev. Entomol.*, vol. 51, pp. 45- 66, 2006. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.151146> ↑ [125](#)
- [10] J. Rojas, A. Pérez, J. Martínez y J. Miele, "Actividad antibacteriana de extracto de hojas de *Melia azedarach* L.", *Rev. Colomb. Biotecnol.*, vol. 14, no. 1, pp. 224-232, 2012. ↑ [125](#)
- [11] Z. Barraza, A. Bravo y A. Pérez, "Pseudomonas aeruginosa productora de metabolito con actividad antimicrobiana contra *Burkholderia glumae*" *Rev. Colombiana Cienc. Anim.*, vol. 9, no. S1, pp. 114-121, 2017. <https://doi.org/10.24188/recia.v9.ns.2017.529> ↑ [125](#)
- [12] U. Tomar, and N. Kaushik, "Neem (*Azadirachta indica* A. Jussieu) Biodiversity in India for Bioresource-azadirachtin: An Important Biopesticide", *Asian J. Exp. Sci.*, vol. 25, no. 1, pp. 15-21, 2011. ↑ [125](#)
- [13] J. Mula, D. Peidro, M. Dfaz-Madronero y J. E. Hernandez, "Modelos para la planificación centralizada de la producción y el transporte en la cadena de suministro: una revisión" *Innovar*, vol. 20, no. 37, pp. 179-194, 2010. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/innovar/article/view/29244> ↑ [126](#), [127](#)
- [14] J. Nicholson, P. LaPlaca, A. Al-Abdin, R. Breese, and Z. Khan, "What Do Introduction Sections Tell Us about the Intent of Scholarly Work: A Contribution on Contributions", *Industrial Marketing Management*, vol 73, pp. 206-219, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2018.02.014> ↑ [126](#)
- [15] H.-C. Oh, and I. A. Karimi, "Global Multiproduct Production-Distribution Planning with Duty Drawbacks", *AIChE J.*, vol. 52, no. 2, pp. 595-610, 2006. <https://doi.org/10.1002/aic.10669> ↑ [127](#)
- [16] H. Jung, B. Jeong, and C.-G. Lee, "An Order Quantity Negotiation Model for Distributor-Driven Supply Chains" *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 111, no. 1, pp. 147-158, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.12.054> ↑ [127](#)
- [17] L. Gómez, O. Cardozo y J. Echeverri, "Nuevos análisis lo confirman. Control químico poco efectivo contra la bacteria", Fedearroz, 2010. http://www.fedearroz.com.co/noticias-docs/control_quimico.pdf ↑ [128](#)
- [18] DANE, "Componentes Insumos - Históricos", *Departamento Administrativo Nacional de Estadística*, 2019. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/sistema-de-informacion-de-precios-sipsa/componente-insumos-1/componente-insumos-historicos> ↑ [128](#)
- [19] Cotrisa, "Mercado Internacional - Arroz", *Comercializadora de Trigo S.A.*, 2019. <https://www.cotrisa.cl/mercado/arroz/internacional/> ↑ [129](#)
- [20] FiBL, "FiBL - Statistics", *Research Institute of Organic Agriculture*, 2018. ↑ [129](#)

Adriana Moros Daza

Ingeniera Industrial de la Universidad del Norte con Maestría y Doctorado en Ingeniería Industrial en dicha universidad. Además, estudió un doctorado en Administración de Empresas en la Universität Hamburg. Actualmente es docente de tiempo completo del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad del Norte. amoros@uninorte.edu.co

Henry Mendoza Crespo

Ingeniero Industrial y Economista de la Universidad del Norte, con Maestría en Economía en dicha institución. Actualmente es docente catedrático en la Escuela Internacional de Administración y Marketing en la Universidad Sergio Arboleda sede Barranquilla. henry.mendoza@correo.usa.edu.co

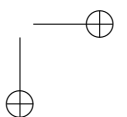
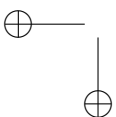


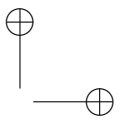
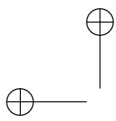
René Amaya Mier

Doctor en Ingeniería Industrial de la Universidad Internacional de Florida (FIU). Es profesor de tiempo completo del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad del Norte, en Barranquilla, Colombia. Es miembro activo del IIE, INFORMS, IEOMS y del Centro de Innovación Logística Latinoamericana (CLI) como parte de la Red MIT Global SCALE, así como socio del Centro de Excelencia Portuario, Transporte y Logística de la Universidad del Norte. ramaya@uninorte.edu.co

Mauricio Ortiz Velásquez

Administrador de Empresas, Master en Marketing Internacional, Master en Administración de Empresas (M.B.A.). Se desempeña como profesor investigador del Departamento de Mercadeo y Negocios Internacionales de la Escuela de Negocios de la Universidad del Norte. Presidente de la Asociación Red Colombiana de Profesiones Internacionales (R.C.P.I.) mortiz@uninorte.edu.co





Review

REVISTA
Ingeniería

Challenges in the Modeling of Traceability in Food Supply Chains

Retos en el modelado de la trazabilidad en las cadenas de suministro de alimentos

Tatiana Maya Trujillo¹, **Javier Arturo Orjuela Castro**¹,
Milton M. Herrera²

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá), ²Universidad Militar Nueva Granada (Bogotá).
correspondence e-mail: tmt_maya@hotmail.com, jorjuela@udistrital.edu.co, milton.herrera@unimilitar.edu.co

Recibido: 24/02/2020. Modificado: 05/12/2020. Aceptado: 21/12/2020.

Abstract

Context: Changes in consumers' eating interests have made the access to information related to specific products relevant, where food supply chain traceability (FSCT) has acquired a significant importance.

Method: In order to identify the main issues and challenges in traceability systems and FSCT modeling, a systematic literature review was conducted, in which 84 articles were analyzed, and different taxonomies were presented for management, optimization, and simulation models. Then, a discussion was carried out about the challenges and future issues in FSCT modeling.

Results: Limitations were identified in the types of decisions analyzed (tactical and operational), as well as an asymmetric flow of information between links, a lack of robust models, the relevance of information management as an integration tool, gaps in the measurement of technological management policies regarding traceability, the need for holistic models, and gaps in the relationship between traceability and sustainability.

Conclusions: It is necessary to develop models based on technology management, as well as traceability systems that facilitate relations and flows between the different actors, the development of sustainable logistics management models involving traceability, the use of multi-criteria approaches relating multiple links, and quantifying different performance measurements in FSC to maximize the benefits of traceability by means of multi-objective models.

Keywords: food supply chain, traceability systems, traceability modeling, management, optimization models

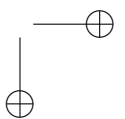
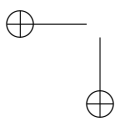
Language: Spanish

Open access



Cite this paper as: Maya, T., Orjuela, J. A., Herrera, M. M.: Retos en el modelado de la trazabilidad en las cadenas de suministro de alimentos. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 2, pp. 143-172 (2021).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
<https://doi.org/10.14483/23448393.15975>



Resumen

Contexto: Los intereses en los hábitos alimentarios de los consumidores han vuelto relevante el acceso a la información relacionada con un producto, donde toma relevancia la trazabilidad en la cadena de suministro de alimentos (TCSA).

Método: Para identificar los principales focos problemáticos y los retos a enfrentar en los sistemas de trazabilidad y el modelado de la TCSA, se realizó una revisión sistemática de la literatura en la que se analizaron 84 artículos y se presentaron diferentes taxonomías sobre modelos de gestión, modelos de optimización y modelos de simulación, luego se realizó una discusión sobre retos y futuros focos en el modelado de trazabilidad en las cadenas de suministro de alimentos (CSA).

Resultados: Se identificaron limitaciones en el tipo de decisiones analizadas (tácticas y operativas), asimetrías en el flujo de información entre eslabones, falta de modelos robustos, relevancia de la gestión de la información como instrumento de integración, vacíos en la medición de políticas de gestión tecnológica en la trazabilidad, necesidad de modelos holísticos y brechas en la relación entre trazabilidad y sostenibilidad.

Conclusiones: Hace falta el desarrollo de modelos basados en la gestión de tecnologías, los sistemas de trazabilidad que faciliten las relaciones y los flujos entre los diferentes actores, el desarrollo de modelos de gestión logística sostenible que involucren la trazabilidad, la utilización de enfoques multicriterio relacionando múltiples eslabones y cuantificar diferentes medidas de desempeño de la CSA para maximizar los beneficios de la trazabilidad mediante modelos multiobjetivo.

Palabras clave: cadena de suministro de alimentos, sistemas de trazabilidad, modelado de la trazabilidad, gestión, optimización, simulación

Idioma: Español

1. Introducción

Los requisitos para documentar los productos alimenticios son cada vez mayores, se ha aprobado una amplia legislación nacional e internacional para garantizar la seguridad alimentaria, y tanto la industria como los consumidores también están cada vez más interesados en conocimientos adicionales sobre el origen, los procesos y otras propiedades del producto [1]. Lo anterior ha hecho que en los últimos años los sistemas de trazabilidad, entendidos como la “totalidad de datos y operaciones que es capaz de mantener la información deseada sobre un producto y sus componentes a través de toda o parte de su cadena de producción y utilización” (ISO 22005: 2007) [2], hayan tomado relevancia por las implicaciones que tienen en el desempeño de las cadenas de suministro (CS), independientemente del sistema de producción y el tipo de alimento [3]. De esta forma, la trazabilidad es esencial para las compañías, por diferentes razones, entre las que se encuentran el cumplimiento de la normatividad vigente, los estándares internacionales, los requisitos de certificación, la implementación de estrategias y programas de marketing, la certificación de origen del producto, la identidad, la calidad y garantizar la seguridad alimentaria con métodos eficaces para responder a los problemas de identificación y seguridad sanitaria de los alimentos [4].

La trazabilidad no es la información del producto y el proceso en sí, sino una herramienta que permite encontrar esta información nuevamente en un momento posterior [1], por lo tanto, el sistema de trazabilidad se convierte en un elemento fundamental que mejora el desempeño de la CSA, que contribuye en varios aspectos, tales como: i) integridad de los alimentos, ii) mitigación de los

problemas que conlleva la adulteración y iii) favorecimiento de la posición en el mercado con características distintivas de calidad e inocuidad [5]. La trazabilidad no es un término trivial, la revisión de la literatura muestra que incluso en las revistas científicas existe confusión e incoherencia [6]. Estudios previos han tratado de estructurar una definición unificada de trazabilidad; sin embargo, no se ha logrado llegar a una definición clara para la CSA, tal como lo afirman Dabbene *et al.* [4]. De igual forma, la CSA es tratada por separado de los sistemas de trazabilidad, sin tener en cuenta que ambas coexisten, a pesar de que en cada eslabón pueden funcionar de forma independiente, el impacto final no es mutuamente excluyente [7]. Dicha falta de relación es evidente al observar la atención que ha recibido la trazabilidad en la última década en relación con su capacidad para impulsar la conectividad de la información en la CS y reforzar el proceso logístico, así como la gestión de CSA en su conjunto [8].

En los últimos años, los aspectos de la trazabilidad se han reconocido como una herramienta fundamental para garantizar la seguridad y la calidad de los alimentos; por lo que el diseño e implementación de un sistema de trazabilidad requiere un replanteamiento y una reorganización exhaustiva de toda la CSA [4], esta necesidad resalta nuevamente la conexión entre la trazabilidad y la gestión de la CS, la cual ha sido tratada desde hace algunos años. Por ejemplo, Wang *et al.* presentan un modelo integrado de planificación de operaciones y trazabilidad para la gestión de alimentos perecederos [9], Thakur y Hurburgh modelan el intercambio de información entre actores en la cadena de suministro de granos [3], Saltini y Akkerman simulan diferentes escenarios para evaluar el impacto de la profundidad y la estrategia de un sistema de trazabilidad en la eficiencia de la producción y el retiro del producto [10], Gautam *et al.* modelan los efectos de implementar un sistema de trazabilidad basado en RFID [11]; estos trabajos resaltan la importancia de profundizar en la conexión existente entre la trazabilidad y la gestión de la CSA, conexión dada por las propiedades únicas que la CSA tiene, como son: la percibibilidad, las estrictas regulaciones, las limitaciones operativas. Preservar la frescura y la calidad del producto requiere plazos de entrega limitados, condiciones de almacenamiento controladas, lo que deriva en mejor calidad y minimiza las pérdidas debidas al deterioro [12]. Esta situación implica entender la dinámica de flujos de información y material que ocurren en la CS. En este sentido, diferentes autores han desarrollado modelos que contribuyen a representar la relación dinámica de flujos de información y material a lo largo de la cadena [3]. Si bien, existen diferentes estudios que emplean el modelamiento para el diseño e implementación de los sistemas de trazabilidad, aún no se han identificado las potencialidades del modelado de los sistemas de trazabilidad en la CSA, lo cual es indispensable si se tiene en cuenta que los sistemas de trazabilidad de alimentos impactan en la eficiencia y la efectividad de la CS [2], así como en la calidad y la capacidad de respuesta [13].

En este contexto, se requiere una revisión sistemática de la literatura que permita identificar dichas potencialidades y contribuya a entender las implicaciones del modelamiento de los sistemas de trazabilidad en el desempeño de la CSA desde diferentes enfoques, logrando tener un acercamiento a la conexión entre trazabilidad y gestión de la cadena de suministro desde el modelado.

A través de una revisión sistemática de la literatura, este artículo discute tres aspectos que inciden en el modelado de la trazabilidad en la CSA: i) conceptualización de la trazabilidad, ii) sistemas de trazabilidad y iii) diferentes enfoques de modelado de la trazabilidad en la CSA. Además, el artículo contribuye con identificar los focos problemáticos en los sistemas de trazabilidad de la CSA y los

retos que enfrenta el modelado de la trazabilidad en la CSA. La metodología utilizada en la revisión de literatura se presenta a continuación. Luego se presentan los resultados obtenidos de la revisión sistemática de forma organizada en dos subsecciones: a) conceptualización de la trazabilidad y b) taxonomía propuesta para identificar los enfoques con los cuales se han abordado los sistemas de trazabilidad en la CSA. Adicionalmente, se muestran diferentes enfoques de modelado de la trazabilidad en la CSA: modelos de gestión, enfoques en técnicas de optimización y de simulación, lo cual permite una taxonomía general sobre el modelado de la trazabilidad en las CSA. Más adelante, se presentan los trabajos futuros identificados a partir de la revisión de la literatura, determinando vacíos del conocimiento (gaps), focos problemáticos y retos a enfrentar en futuras investigaciones.

2. Metodología

La revisión sistemática de la literatura se apoya en las metodologías propuestas por Kitchenham [14] y Rincón *et al.* [15] para resolver las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuáles han sido los principales enfoques a través de los cuales se ha investigado la trazabilidad en la CSA? ¿Cuáles han sido las principales técnicas utilizadas para el modelado de la trazabilidad en la CSA? ¿Qué métodos de solución se han utilizado para optimizar la trazabilidad en la CSA? ¿Qué implicaciones y retos conlleva el modelado de los sistemas de trazabilidad en la CSA? La Tabla I presenta la secuencia de pasos adoptados para la revisión sistemática, la cual permite identificar, evaluar e interpretar la literatura relevante para posteriormente determinar los posibles impactos del modelado de los sistemas de trazabilidad de la CSA en su gestión y su desempeño.

3. Resultados

Es esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la revisión de la literatura que comprende las principales definiciones de trazabilidad y se establece una posición teórica, luego se presentan los enfoques que han sido abordados para los sistemas de trazabilidad. Posteriormente, se propone una breve taxonomía de los enfoques de modelado en la TCSA, esta parte se divide en: modelos de gestión de la CSA relacionados con trazabilidad, modelos con técnicas de optimización y modelos de simulación.

A partir del año 2009 se evidencia un crecimiento en el número de publicaciones con respecto al modelado de la trazabilidad en la CSA, destacándose un incremento para los años 2011 y 2015, como ilustra la Figura 1. Gracias a esto la literatura ha desarrollado diferentes corrientes de investigación en trazabilidad de alimentos, entre las que se destacan: el desarrollo de sistemas de trazabilidad eficaces respaldados por diversas tecnologías de identificación de productos, el uso de información de trazabilidad para mejorar la gestión de la CS y el uso de enfoques de gestión de operaciones para mejorar la gestión de la trazabilidad [16]. En esta última corriente de investigación autores como Dupuy *et al.* (2005), Bertolini *et al.* (2006), Thakur *et al.* (2010), Wang *et al.* (2012), Dai *et al.* (2015), Li y Wang (2017), Gautam *et al.* (2017), Yu *et al.* (2018) y Dai *et al.* (2020), entre otros, buscan mejorar la gestión de la trazabilidad mediante el enfoque de gestión de operaciones y reafirman la necesidad de desarrollar nuevos enfoques metodológicos que permitan realizar análisis estructurados de trazabilidad [16]. Esto demuestra la importancia del modelamien-

Tabla I. Pasos secuenciales de la revisión de la literatura

Etapas	Actividades
Protocolo y estrategia de búsqueda	<p>Búsqueda en las bases de datos Scopus, Web of Science y IEEE Xplore.</p> <p>El algoritmo de búsqueda fue: “traceability” limitado a título, palabras claves y resumen, y se enlazó a la expresión “food supply chain”, limitada de igual forma. Como algoritmos de búsqueda adicionales se utilizaron: “modelling traceability - food supply chain”, “optimization traceability - food supply chain”, “simulation traceability - food supply chain”.</p> <p>La búsqueda se limitó a los documentos categorizados como: artículos, conference papers o revisiones.</p> <p>De acuerdo con los criterios de búsqueda adicionales se establecieron como temas de interés: definición de la trazabilidad y los enfoques utilizados para el modelado de la trazabilidad en la cadena de suministro de alimentos (TCSA), enfatizando en los modelos de gestión, optimización y simulación.</p> <p>Tabulación en hoja de cálculo, empleada para la categorización de los artículos y el análisis de información</p>
Revisión, criterios de selección	<p>Criterios de selección: artículos multidisciplinarios ordenados por relevancia que se refieran a alimentos y productos alimenticios; de acuerdo con la primera búsqueda se evidenció un crecimiento en el número de publicaciones sobre la TCSA desde el año 2009, razón por la cual se excluyen los publicados antes del 2009, a excepción de los seminales.</p> <p>Selección de cada uno de los artículos para verificar su calidad, su procedencia y su disponibilidad.</p>
Extracción de datos	<p>Diligenciamiento de la lista de referencia para los artículos seleccionados bajo los criterios de búsqueda adicionales, con datos generales como: objetivo, campo de aplicación, temática principal, resultados, metodología utilizada y trabajos futuros.</p> <p>Revisión de los artículos relacionados con el modelado de la TCSA, posteriormente se analizaron aquellos con enfoque de optimización, de simulación y otros enfoques.</p>
Síntesis de datos e informe	<p>Se analizó cada uno de los aportes de los autores en las técnicas de modelado de la TCSA.</p> <p>Se realizó un resumen general de los principales enfoques utilizados en el modelado de la TCSA</p> <p>Se elaboraron cuadros comparativos y de análisis de variables y métodos de solución utilizados</p>

to en los sistemas de trazabilidad y denota la necesidad de diseñar modelos que permitan abordar los problemas y retos que implica la adopción de tecnologías de trazabilidad en la última década.

El mayor número de publicaciones de trazabilidad en la CSA, en las bases de datos consultadas, se presenta entre 2015 y 2019, como ilustra la Figura 2. El número de publicaciones muestra la relevancia en términos de contribuciones a la investigación alcanzada en la última década. Esto implica un interés creciente en el modelado para el desarrollo y la adopción de sistemas de trazabilidad en la CSA.

De los documentos seleccionados a partir de la revisión sistemática, el 63 % corresponde a artículos de investigación, el 8 % a revisiones de la literatura y el restante a artículos de conferencias.



Figura 1. Tendencia histórica de las publicaciones en la temática

Los autores identificados en la ventana de observación (2009-2019) más relevantes, de acuerdo con el número de publicaciones sobre TCSA son de: Xiaoshuan Zhang, Zetian Fu, Linhai Wu, Jianping Qian y Lingling Xu de China, Petter Olsen, Kine Karlsen y Kathyn Donnelly de Noruega, Wim Verbeke de Bélgica, Giovanni Mirabelli, Teresa Pizzuti y Luigi Patrono de Italia, Liliana Moga de Polonia, Jack van der Vorst de Países Bajos y Maitri Thakur y Tejas Bhatt de Estados Unidos. En este contexto, el mayor número de publicaciones identificadas han sido elaboradas para países desarrollados, lo cual muestra la necesidad de investigación para los países de Latinoamérica en particular.

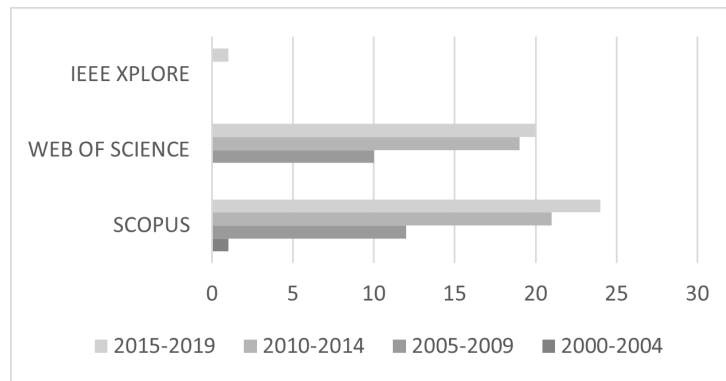


Figura 2. Publicaciones por bases de datos consultadas

3.1. Conceptualización de la trazabilidad

En el primer artículo de TCSA, publicado en 1996 y escrito por Hobbs [17], se resalta la importancia de la trazabilidad para la seguridad alimentaria y se enfatiza en los costos derivados del monitoreo realizado a la trazabilidad. A partir de 2002 se presentó un aumento considerable en

el número de publicaciones con respecto a los alimentos, en particular después de una serie de incidentes relacionados con la inocuidad de los alimentos durante los cuales se demostró que los sistemas de trazabilidad eran débiles o ausentes [18]. El desarrollo de estos incidentes, así como la aparición de brotes sanitarios produjeron que diferentes países desarrollaran e implementaran requisitos legales sobre trazabilidad, definiendo métodos y autoridades de control para monitorear productos alimenticios no seguros [4]. Esta nueva legislación llevó a que las empresas se interesaran en el tema y desarrollaran sistemas de trazabilidad eficientes. Sin embargo, es importante resaltar que existen casos en los que se implementó la trazabilidad en forma temprana, antes de ser un requisito legal, esto motivado por el aumento de los ingresos generados por sistemas de distribución de menor costo, la reducción de gastos de retiro de productos y las ventas ampliadas de productos con alta seguridad y calidad [19].

La trazabilidad ha tomado relevancia en diferentes campos, tales como: tecnológico, social y administrativo [8], [15]. Diferentes autores han definido la trazabilidad; sin embargo, no hay una definición clara para la CSA, impidiendo un marco conceptual común de trazabilidad [15], [20].

La ISO 8402-1994 define la trazabilidad como: “La capacidad de rastrear el historial, la aplicación o la ubicación de una entidad mediante identificaciones registradas” [21], esta misma definición fue adoptada por [20], [22], [23] y [24], en esta se resalta la importancia de disponer de la información histórica del producto. En este mismo enfoque, Tamayo [25] define la trazabilidad como la capacidad para rastrear bienes a lo largo de la cadena de distribución con base en un número de lote o número de serie [25], adicionalmente Regattieri [26] afirma que la trazabilidad permite el rastreo de los productos, convirtiéndose en el registro de la historia de un producto. Manos y Manikas [27] entienden la trazabilidad como la capacidad de rastrear el historial del producto a través de la CS hacia o desde el lugar y el momento de la producción, incluida la identificación de los insumos utilizados y las operaciones realizadas. Mientras Olsen y Borit [6] plantean una definición más general, definiéndola como la capacidad de acceder a cualquiera o toda la información relacionada con el producto que se está controlando, a lo largo de todo su ciclo de vida, por medio de la identificación y el registro. La definición con mayor difusión es: “la trazabilidad es la capacidad para seguir históricamente una aplicación o localización de algo que este bajo consideración u observación” [21], concepto general y ambiguo del término de trazabilidad.

La Tabla II presenta un resumen de las principales definiciones de trazabilidad identificadas a partir de la revisión de literatura. Estas definiciones evidencian la existencia de tres conceptos clave: rastreo, seguimiento e información. El seguimiento es la capacidad de seguir el camino de un producto a lo largo de la CS, mientras que el rastreo se refiere a la capacidad de determinar el origen y las características de un producto en particular, obtenido al referirse a los registros mantenidos en la CS [28]. Para este artículo se adopta la siguiente definición: “la trazabilidad es la capacidad de rastrear y seguir un alimento y su unidad trazable previamente identificada, por medio de registros físicos o digitales a lo largo de toda la CS para el control y localización en cualquier momento a lo largo del ciclo de vida de dicha unidad, que permita la toma de decisiones” [15], ya que contempla de forma explícita la capacidad de rastrear y seguir un alimento y mantener los registros físicos o digitales de estos, información que estará disponible a lo largo de toda la CSA.

Tabla II. Definiciones de trazabilidad

Autores	Definición de trazabilidad
Ley General de Alimentos de la CE (Comisión Europea, 2004c)	La capacidad de rastrear y seguir un alimento, un pienso, un animal o una sustancia productora de alimentos que se pretende, o que se espera que se incorpore a un alimento o un pienso, en todas las etapas de producción, procesamiento y distribución [29].
Van der Vorst <i>et al.</i> (2005)	Información que puede ser utilizada para informar a las partes interesadas sobre el paradero de elementos o productos particulares (físicos), su historial, propiedades dinámicas, contenido y relaciones con otros productos [30].
Rábade y Alfaro (2006)	El registro y seguimiento de piezas, procesos y materiales utilizados en la producción [31].
Folinas <i>et al.</i> (2006), Canavari <i>et al.</i> (2010)	La capacidad de rastrear y seguir un alimento, animal o sustancia productora de alimentos en todas las etapas de producción y distribución [32], [33].
Regattieri <i>et al.</i> (2007)	El método para proporcionar suministros de alimentos más seguros y para conectar a productores y consumidores. Es aplicable a todos los productos y todos los tipos de CS [26]. La historia de un producto en términos de las propiedades directas de ese producto y / o propiedades que están asociadas con ese producto, una vez que estos productos han sido sujetos a procesos particulares de valor agregado utilizando medios de producción asociados y en condiciones ambientales asociadas [26].
Van Rijswijk <i>et al.</i> (2008)	La capacidad de rastrear y seguir los alimentos y los ingredientes de los alimentos a través de la CS; por lo tanto, la trazabilidad se puede aplicar en todas las etapas de producción, procesamiento y distribución [34].
ISO 22005-2009	La capacidad de seguir un alimento para consumo humano o un alimento para animales, en las etapa(s) especificada(s) de producción, procesamiento y distribución [21].
Bosona <i>et al.</i> (2013)	La habilidad para rastrear y ubicar un producto en la CS [8].
Dabbene <i>et al.</i> (2014)	La capacidad de garantizar que a los productos que se “mueven” a lo largo de la CSA se les realiza seguimiento y rastreo [4].
Rincón <i>et al.</i> (2017)	Capacidad de rastrear y seguir un alimento y su unidad trazable previamente identificada, por medio de registros físicos o digitales a lo largo de toda la CS para el control y localización en cualquier momento a lo largo del ciclo de vida de dicha unidad, para la toma de decisiones [15].

3.2. Sistemas de trazabilidad

La naturaleza compleja del procesamiento de alimentos y la captura del volumen masivo de información han dificultado la implementación de la trazabilidad [35]. Estas complejidades requerían tecnologías y métodos avanzados para capturar datos de alta calidad sobre el producto y el proceso de producción. Si bien el registro de la información en sí no es difícil, en la práctica, obtener acceso a la información más adelante puede ser un desafío [6]. Por ejemplo, rastrear un producto terminado desde todos sus ingredientes y materias primas junto con todos los registros asociados resultará en una cantidad abrumadora de información, difícil de comunicar o analizar [23]. Como los sistemas de trazabilidad pueden archivar y comunicar información sobre la calidad del producto, el origen y la seguridad del consumidor se convierten en herramienta indispensable de trazabilidad, ya que almacenan y proporcionan información en tiempo real sobre la ubicación y la historia del producto en la CSA [32], [36] y [37].

La Tabla III presenta los artículos más destacados que abordan y discuten temas relacionados con los sistemas de trazabilidad (ST), se presenta una clasificación basada en el diseño y la implementación de sistemas de trazabilidad, es decir los modelos, arquitecturas, metodologías o enfoques implementados. También, se consideraron trabajos enfocados en la validación o mejora de ST ya existentes. La mayor cantidad de documentos se concentran en el diseño e implementación de los ST. En este sentido, implica la necesidad de modelar la integración de las tecnologías de trazabilidad a lo largo de la CSA y evidenciar los efectos en su desempeño.

3.3. Modelado de la trazabilidad en la cadena de suministro de alimentos

La literatura con enfoques o técnicas de modelado y optimización de la trazabilidad ha sido ampliamente estudiada [4]. El objetivo del proceso de modelado del ST es describir el comportamiento del producto como una colección de procesos interactivos, de manera que su acción combinada pueda describir el fenómeno observado y que cada subprocesso pueda entenderse completamente para su descripción [47]. Por medio de la revisión de literatura se ha identificado que la TCSA se ha modelado a partir de diferentes enfoques.

3.3.1. Modelos para la gestión de la cadena de suministro con trazabilidad

La trazabilidad aumenta la eficiencia de la CSA al reducir los costos de las actividades relacionadas con la distribución de productos alimenticios [19]. Un ST adecuado puede contribuir a la competitividad de los eslabones de la CSA [5], [48]. Varios autores han planteado metodologías que facilitan la gestión de la cadena de suministro (GCS), identifican factores que influyen en la gestión de la trazabilidad en la CS. Por ejemplo, Karlsen *et al.* [1] discuten el efecto de diferentes niveles de granularidad en los desempeños del ST a través de la identificación de puntos críticos de trazabilidad en la CSA. Estudios posteriores de Karlsen y Olsen [20] analizan la validez de los métodos cualitativos en ST. En esta vía, Faisal y Talib [2] proponen una metodología basada en un enfoque de modelado estructural interpretativo (ISM, por sus siglas en inglés) para determinar y comprender las interacciones entre las diversas variables de la TCSA y el orden de prioridad. Paralelamente, Chaudhuri *et al.* [49] desarrollan una metodología de ISM difuso (Fuzzy ISM) y la multiplicación de referencia cruzada en una matriz de impacto aplicada en una clasificación (MICMAC) para identificar riesgos que afectan la CS. Este trabajo propone un mapa de propagación del riesgo en la CS respecto a la trazabilidad.

Balaji y Arshinder [50] identifican las causas del desperdicio de alimentos, así como el poder impulsor y la dependencia de las causas en el análisis de las interacciones entre ellas, con un enfoque basado en MICMAC difuso y modelado estructural interpretativo total (TISM). Identifican 16 variables causales del desperdicio de alimentos. En esta vía, Khan *et al.* [35] desarrollaron un modelo basado en la relación contextual entre los factores críticos de éxito (CSF) a través del enfoque del TISM. Identifican 12 CSF con base en una revisión de la literatura y la opinión de los expertos, el modelo estructural se analizó mediante el método Fuzzy MICMAC. Shakar *et al.* [51] desarrollaron un marco integral para la implementación de un sistema logístico de alimentos basado en la trazabilidad, sobre la base de la teoría del CSF y el enfoque de múltiples partes interesadas en la garantía de calidad, postularon un modelo jerárquico para representar la interrelación entre los CSF estadísticamente significativos.

Tabla III. Los sistemas de trazabilidad en la literatura

Autores	Síntesis	Tecnología de soporte empleada	Tipo
Salampasis <i>et al.</i> (2012)	Desarrollaron la herramienta TraceALL como un marco orientado a servicios, para proporcionar una metodología formal, cuyo propósito general es apoyar la representación del conocimiento y el modelado de la información en los ST e implementar aplicaciones de rastreabilidad [38].	Ontologías y Web semántica (SW)	VM
Hu <i>et al.</i> (2013)	Modelo basado en un enfoque de sistemas para el diseño e implementación de un ST. Se resalta la importancia de estándares tecnológicos para establecer, registrar y permitir colaboraciones empresariales [39].	Unified Modeling Language	DI
Mgonja <i>et al.</i> (2013)	Determinaron una herramienta de diagnóstico para validar el rendimiento del ST, se identifican los indicadores más relevantes de trazabilidad [40].	Diagramas de flujo de procesos conceptuales.	VM
Pizzuti y Mirabelli (2015)	Diseño de un ST cuyo principal objetivo es facilitar la integración de la información en toda la CS y garantizar la confianza del consumidor y el cumplimiento de las normas legales y de calidad. Crean el Global Track (sistema informativo para almacenar, gestionar y transmitir datos) [41].	Modelado por BPMN, Diagramas de procesos de negocios (BPD)	DI
Liang <i>et al.</i> (2015)	Crearon un modelo de trazabilidad de la CS de ganado y un ST basado en la tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID) y la red EPCglobal [42].	EPCIS, Paquetes de software Fosstrak y FreePastry y AggregationEvent	DI
Chen (2015)	Modelo para el desarrollo de un ST basado en algoritmo de rastreo autónomo [43].	IoT, mapas cognitivos difusos y método de reglas difusas.	VM
Verdouw <i>et al.</i> (2016)	Se analiza el concepto de las CSA virtuales desde una perspectiva de Internet de las cosas (IoT) y propone una arquitectura para implementar sistemas de información habilitadores [44].	IoT	DI
Kim y Laskowski (2018)	Desarrollaron una metodología para el diseño de un ST basada en contratos inteligentes a través de Blockchain (Se ejecuta un rastreo de procedencia y se hacen cumplir las restricciones de trazabilidad) [45].	Blockchain	DI
Fernández-Caramés <i>et al.</i> (2018)	Presentan un ST para rastrear los suministros agroalimentarios chinos, cuyo objetivo es mejorar la seguridad y la calidad de los alimentos y reducir las pérdidas en la logística [46].	RFID y Blockchain	DI

(DI: Diseño e implementación de un ST, VM: Validación o mejora de un ST)

3.3.2. Modelado de trazabilidad con técnicas de optimización

La planificación de operaciones y los problemas de diseño en la industria alimentaria a menudo están relacionados con la elección de materias primas, o la cantidad y el tamaño de los lotes, entre otros. Los modelos de programación lineal entera mixta (MILP) o de programación no lineal

(MINLP) se utilizan con frecuencia para tales problemas con una clara función objetivo cuantitativa u objetivos cuantitativos multicriterio [9]; en los últimos años en dichos problemas de diseño se han empezado a considerar los sistemas de trazabilidad, ya que en CSA las características son diferentes a las demás, garantizar el seguimiento, el control y la localización del alimento a lo largo de la cadena y la disponibilidad de toda la información relacionada en cualquier momento permite mejorar el desempeño de la cadena y la satisfacción del cliente. En este contexto, se evidencia que en los modelos de optimización, la inclusión de características específicas de los alimentos no es suficientemente abordada [52], lo limita la gestión de ST, la adopción de tecnologías y el uso de información proporcionada para la toma de decisiones.

En técnicas de optimización en la CS orientadas a mejorar la trazabilidad y minimizar los costos, la teoría está bastante desarrollada [4]. Sin embargo, se requieren modelos que aborden los problemas de seguridad y calidad de alimentos con sistemas de trazabilidad y los relacione con los factores de operación en la cadena, para la mejora de las operaciones y el desempeño de la trazabilidad de forma conjunta [16]. Se evidencia la necesidad de que la gestión de la trazabilidad en los alimentos permita comunicar la información a los consumidores y otras partes interesadas [8], aspectos a considerar a la hora de modelar. Por otro lado, si se considera el grado de incertidumbre, el número de enlaces intermedios y eslabones en la CS, la demanda y los costos logísticos difusos, el modelo debe contemplar la imprecisión y los retardos en la información a lo largo de la CS [53]. En este contexto se han utilizado técnicas que abordan las relaciones complejas generadas a lo largo de la CS y se ha enfatizado en la importancia del uso de sistemas de trazabilidad que garanticen la disponibilidad y la calidad de la información. La Tabla IV presenta los principales modelos de optimización aplicados para el análisis de trazabilidad. Se muestran las técnicas de optimización de mayor uso en la literatura, tales como MILP, MINLP, programación dinámica (DP) o programación estocástica (SP), se evidencia la necesidad de contemplar la incertidumbre y la complejidad, en términos de modelado del ST.

Mohammed [65] es el autor con mayor número de citas, mientras Dupuy [54] es el primero en abordar el problema del tamaño de lote apropiado y las reglas de mezcla para mejorar el desempeño del ST. En 2009, Wang [9] propone un modelo de optimización integrado, se desarrolla en un contexto de producción por lotes, donde un lote de producto terminado podría producirse a partir de varios lotes de materia prima heterogéneos con diferentes características de precio o riesgo, se concluye que la clasificación del riesgo por cada lote de materia prima influye de manera considerable en el desempeño de la cadena. En 2010, Wang [16] modifica el modelo introduciendo funciones de riesgo relacionadas con la seguridad alimentaria. Los dos trabajos publicados por Wang, junto con el trabajo en 2008 de Dabbene [47] y el de Thakur [56] en 2010 se consideran las publicaciones seminales en el modelado de la trazabilidad desde un enfoque de optimización.

En 2006, Van der Vorst [30] señaló la necesidad de enfocarse en la complejidad total de las CSA, por lo que sugiere que deben ser analizadas como una estructura en red. Este concepto es argumentado por Nagurney en 1999, quien proponía la teoría económica de redes, la cual proporcionó un marco matemático para la CS, su representación y análisis gráfico [67]. En el mismo concepto, Dabbene [47] en 2008 plantea que el proceso de trazabilidad en producción puede modelarse como un gráfico interconectado, donde los lotes de materias primas se representan como nodos y los arcos representan operaciones de mezcla que conducen a productos finales. Posteriormente en

Tabla IV. Principales modelos de optimización que involucran trazabilidad

MILP: programación lineal entera mixta, MINLP: programación no lineal entera mixta, MP: programación multiobjetivo, MOINLP: programación no lineal con varios objetivos, PNL: programación no lineal, DP: programación dinámica, SP: programación estocástica		
Autores	Artículo	Técnica
Dupuy <i>et al.</i> (2005)	Propone por primera vez el problema de la evaluación del rendimiento y la optimización de los ST [54].	MILP
Li, Kehoe y Drake (2006)	Modelo de planificación innovador para la planificación de la cadena de suministro de alimentos perecederos [55].	DP
Dabbene <i>et al.</i> (2008)	Modelo híbrido para la optimización del rendimiento de la cadena de suministro de alimentos frescos, gestiona una compensación entre los costos logísticos y algunos índices que miden la calidad del alimento, se considera un comportamiento dinámico [47].	DP
Wang <i>et al.</i> (2009)	Modelo de optimización que integra iniciativas de trazabilidad con factores de operación para alcanzar la calidad deseada y lograr el impacto mínimo en la recuperación del producto de una manera económica [9].	MINLP
Wang <i>et al.</i> (2010)	Modelo de optimización conjunta de la trazabilidad y los rendimientos de fabricación, actuando tanto en el tamaño como en la dispersión de los lotes, mediante la introducción de funciones de riesgo relacionadas con la seguridad alimentaria [16].	MINLP
Thakur <i>et al.</i> (2010)	Modelo de optimización de objetivos múltiples que proporciona un método eficaz para minimizar el esfuerzo de trazabilidad garantizando la seguridad alimentaria y reduciendo el riesgo causado por la agregación de lotes en un elevador de granos [56].	MP enteros mixtos
Rong <i>et al.</i> (2011)	Metodología para modelar la degradación de la calidad de los alimentos e integrarla en un modelo de programación para la planificación de la producción y distribución [52].	MILP
Ahumada y Villalobos (2011)	Modelo operativo para ayudar a tomar decisiones de producción y distribución durante la cosecha [57].	MILP
Wang <i>et al.</i> (2012)	Modelo de precios basado en la evaluación dinámica de la calidad. Se evalúan los beneficios de la utilización de trazabilidad a través de diferentes políticas de precios, incluyen la variación de la calidad derivada de 175 cambios de temperatura a través del tiempo [58].	DP
Piramuthu <i>et al.</i> (2013)	Modelo para minimizar el costo de responsabilidad conjunta, introduciendo una función de degradación de la calidad exponencial en el tiempo [59].	MILP
Yu y Nagurney (2013)	Modelo de CSA basado en redes bajo competencia oligopolística y perecedera. Incorpora el deterioro a través de la introducción de multiplicadores de arco, con la inclusión de los costos de desecho asociados a la eliminación de alimentos en mal estado [60].	Modelado de redes
Hertog <i>et al.</i> (2014)	Modelo de optimización de la cadena de frío basado en la vida útil del producto, busca hacer seguimiento a pérdidas e inocuidad de los alimentos en los almacenes para lo que plantea un algoritmo de seguimiento exhaustivo y determina la vida útil faltante de los alimentos [61].	Optimización combinatoria
Aiello <i>et al.</i> (2015)	Modelo de optimización que busca aumentar la eficiencia de la CS y sus retornos, se centra en un análisis económico para determinar el valor de la información generada por el ST en comparación con el costo operacional [62].	SP

MILP: programación lineal entera mixta, MINLP: programación no lineal entera mixta, MP: programación multiobjetivo, MOINLP: programación no lineal con varios objetivos, PNL: programación no lineal, DP: programación dinámica, SP: programación estocástica

Autores	Artículo	Técnica
Dai <i>et al.</i> (2015)	Modelo de análisis matemático, muestra las asimetrías existentes en los incentivos para mejorar la trazabilidad del sistema a lo largo de la CS. Propone un mecanismo de participación en los intereses en el diseño de los sistemas de rastreabilidad de la CS [63].	Análisis matemático
Li y Wang (2017)	Modelado de análisis matemático, representa la relación demanda precio en la cadena de alimentos refrigerados al implementar una herramienta de seguimiento basada en una red de sensores [64].	Análisis matemático
Gautamet <i>et al.</i> (2017)	Modelo de programación no lineal con varios objetivos para una CS de kiwi, cuando se utiliza un ST basado en etiquetas RFID [11].	MOINLP
Mohammed (2017)	Modelo para evaluar la viabilidad económica del sistema de monitoreo habilitado con RFID para el diseño de la CS de carne halal [65].	MP
Dai <i>et al.</i> (2017)	Modelo para optimizar conjuntamente la capacidad de seguimiento y el precio teniendo en cuenta el costo de seguimiento y recuperación en una CS [66].	PNL
Soto-Silva <i>et al.</i> (2017)	Modelo integrado para dar una solución conjunta a la compra, el transporte y el almacenamiento de los productos frescos [12].	MP
Yu <i>et al.</i> (2018)	Modelo difuso multiobjetivo para el diseño de una CS para productos agrícolas frescos, de dos canales con incertidumbre en información. Se considera: costo de producto desperdiciado, trazabilidad, transporte y localización de instalaciones [53].	MP difuso

2018, Yu *et al.* [53] también plantean la cadena de suministro de alimentos perecederos como una red, mediante un grafo que considera el grado de incertidumbre causado por el número de enlaces intermedios y eslabones que componen la CSA. Varios modelos aplican la optimización entera mixta, por la característica de las variables, tales como el seguimiento de los cambios, los orígenes de los alimentos y la vida útil [9]. Sin embargo, teniendo en cuenta que la demanda y los costos logísticos son imprecisos, es necesario formular el diseño de la cadena de suministro de alimentos perecederos teniendo en cuenta la incertidumbre y la información difusa [53]. En la Tabla V se muestra el método de solución y las consideraciones especiales de cada formulación.

En la Tabla VI se presenta la clasificación de las funciones objetivo. En la mayoría maximizan la ganancia, el ingreso neto o el valor presente neto [12], algunos autores plantean maximizar la rentabilidad de cada empresa participante en la CSA [60]. Dai *et al.* [63], en 2015, es el primero en incluir las asimetrías en los incentivos recibidos por los diferentes eslabones de la CS al integrar la trazabilidad, aspecto de relevancia al incluir a todas las partes interesadas, lo que permitiría obtener el mayor beneficio para la cadena en general [4]. Sin embargo, desarrollar sistemas de trazabilidad detallados no es fácil para los eslabones más pequeños, ya que carecen de capacidad financiera, información de trazabilidad adecuada y conocimientos suficientes para implementarla [8], por lo que los beneficios netos recibidos de manera específica por cada eslabón suele ser bastante desequilibrado en comparación a otros.

Se observa que la mayoría de las publicaciones considera factores de degradación o deterioro, se tiene tradición en la integración de los efectos de pérdida de valor en los modelos matemáticos

Tabla V. Métodos de solución y consideraciones especiales

	Autores	Método de solución	Considera
[9]	Wang <i>et al.</i> (2009)	Optimización, Modelo EPQ	Enfoque de evaluación de riesgos. Ciclo de vida útil.
[56]	Thakur <i>et al.</i> (2010)	Frente óptimo de Pareto	El problema de mezcla de granos a granel y la agregación de lotes.
[16]	Wang <i>et al.</i> (2010)	Simulación del número finito de valores binarios	Factores operacionales, de vida útil y de trazabilidad.
[52]	Rong <i>et al.</i> (2011)	Modelado de múltiples períodos Estructura de red de distribución genérica	Combinan modelos de deterioro de la calidad de los alimentos con modelos de logística. Degradación de la calidad dinámica. Almacenamiento y transporte entre eslabones.
[57]	Ahumada y Villalobos (2011)	Branch and bound	Incluyen productos a cosechar, frecuencia (tiempo por semana) y días de cosecha
[58]	Wang <i>et al.</i> (2012)	Simulaciones numéricas	El modelo se evalúa con diferentes políticas de precios para aprovechar la información capturada a través de un ST. Análisis dinámico de la calidad vs. el precio.
[59]	Piramuthu <i>et al.</i> (2013)	Análisis numérico	Importancia relativa de los niveles de granularidad. Diferencia marginal en los costos de recuperación.
[60]	Yu y Nagurney (2013)	Método de EULER	Equilibrio en los flujos de la red (Cournot-Nash). Formulaciones con desigualdad variacional.
[61]	Hertog <i>et al.</i> (2014)	Algoritmo de búsqueda exhaustiva combinatoria	Perspectiva desde la gestión de almacenes. Inventario finito. Lista de indicadores clave de rendimiento (KPI) para medir la calidad.
[62]	Aiello <i>et al.</i> (2015)	Análisis numérico	Nivel de granularidad óptimo (Lote de Trazabilidad Económica).
[63]	Dai <i>et al.</i> (2015)	Análisis numérico	Dinámica de recuperación en una CS. Mecanismo de intercambio de interés.
[64]	Li y Wang (2017)	Análisis numérico	Utilización de datos de una red de sensores para la toma de decisiones del precio. Vida útil del producto. Búsqueda del precio óptimo.
[11]	Gautam <i>et al.</i> (2017)	Modelo analógico entre el sistema de polinización de plantas y un algoritmo de	Incertidumbre de la información al utilizar un sistema de RFID. Capacidad de transporte. Capacidad de almacenamiento.
[65]	Mohammed, 2017)	Solución óptima de Pareto Algoritmo de toma de decisiones	Utiliza tres objetivos en conflicto. El sistema de trazabilidad utiliza RFID.
[66]	Dai <i>et al.</i> (2017)	Análisis numérico	Capacidad de seguimiento. Busca el equilibrio entre el costo de seguimiento y el de recuperación.
[12]	Soto-Silva <i>et al.</i> (2017)	Método de restricción (convertir un modelo multiobjetivo en uno monoobjetivo)	La planificación de la compra, el transporte y el almacenamiento de productos frescos.
[53]	Yu <i>et al.</i> (2018)	Método de dos fases: 1 fase, Método mini-max y 2 fase enfoque de compromiso difuso	Umbral de incertidumbre en la toma de decisiones.

desarrollados [49], [58], [61], [62], [65], [69]. Otros tienen en cuenta el retiro o recuperación de productos deteriorados o contaminados, en este enfoque lo esencial es identificar el origen de riesgo

Tabla VI. Funciones objetivo planteadas en los modelos de optimización

Autores		Minimizar	Maximizar	Costo total	Contenedores	Prob. retiro del producto	Ingresos	Costos de responsabilidad	Beneficio esperado	Valor de la información	Costo de transporte	Integridad del producto	Retorno de la inversión	Satisfacción de la demanda
[9]	Wang <i>et al.</i> (2009)	X	X											
[56]	Thakur <i>et al.</i> (2010)	X		X										
[16]	Wang <i>et al.</i> (2010)	X	X	X										
[52]	Rong <i>et al.</i> (2011)	X	X											
[57]	Ahumada y Villalobos (2011)		X				Productor							
[58]	Wang y Dong (2012)	X				X								
[59]	Piramuthu <i>et al.</i> (2013)	X						x						
[60]	Yu y Nagurney (2013)		X						X					
[61]	Hertog, <i>et al.</i> (2014)		X										Calidad	
[62]	Aiello <i>et al.</i> (2015)		X							RFID				
[63]	Dai <i>et al.</i> (2015)		X								Incentivos			
[64]	Li y Wang (2015)		X						Minorista					
[11]	Gautam <i>et al.</i> (2017)	X						X			X			
[65]	Mohammed (2017)	X	X										X	X
[66]	Dai <i>et al.</i> (2017)		X				X							
[12]	Soto-Silva <i>et al.</i> (2017)	X	X											
[53]	Yu <i>et al.</i> (2018)	X	X	X										X
TOTAL		13	9	7	1	3	3	2	2	1	2	2	1	1

y retirar todos los productos que no puedan identificarse claramente como seguros [67]. En 2017, Dai *et al.* [67] identifican el origen de riesgo, involucrando la mayor cantidad de eslabones de la CS; la integración de todos los actores permitirá la identificación y el rastreo efectivo de productos. El 35 % de los trabajos estudia dos eslabones, otro 35 % tres y cerca de un 30 % cuatro. La Tabla VII muestra los eslabones tenidos en cuenta en los modelos. En la mayoría de los estudios, la cadena no es abordada en su totalidad, lo que puede llevar a soluciones lejanas a la realidad.

3.3.3. Taxonomía modelos de optimización

De la revisión de literatura realizada se propone una taxonomía para los modelos de optimización, dividiéndolos en los que utilizan programación lineal (PL), programación no lineal (PNL) y otras técnicas de optimización, así mismo se presentan variables y parámetros utilizados en los modelos.

3.3.3.1. Modelos con programación lineal

Las variables y los parámetros de los modelos de PL se presentan en la Tabla VIII y la Tabla IX, respectivamente. En los modelos de PNL la variable de decisión, unidad enviada a otro eslabón, se presenta con mayor frecuencia, siete de los ocho artículos la consideran. En cuatro se utiliza el tamaño de lote como variable, mientras cinco de los modelos usan variables binarias para la toma de decisiones.

Tabla VII. Eslabones de la cadena de suministro de alimentos considerados en cada modelo

	Autores	Productor	Fabricante	Distribuidor	Minorista o cliente final	Centros logísticos
[56]	Thakur <i>et al.</i> (2010)		X		X	
[16]	Wang <i>et al.</i> (2010)		X		X	
[52]	Rong <i>et al.</i> (2011)	X	X	X	X	
[57]	Ahumada y Villalobos (2011)	X	Centro de envasado	X	X	
[58]	Wang y Dong (2012)			X	X	
[59]	Piramuthu <i>et al.</i> (2013)	Múltiples	Múltiples		Múltiples	
[60]	Yu y Nagurney (2013)	X	X	X	X	
[61]	Hertog <i>et al.</i> (2014)	X		X	X	
[62]	Aiello <i>et al.</i> (2015)	Dos			X	
[63]	Dai <i>et al.</i> (2015)	Dos	X			
[42]	Li y Wang (2015)		Múltiples	X	Múltiples	
[11]	Gautam <i>et al.</i> (2017)	X		X	X	
[65]	Mohammed (2017)	X	Matadero	X	X	
[66]	Dai <i>et al.</i> (2017)	X	X		X	
[12]	Soto-Silva <i>et al.</i> (2017)	X	X			
[53]	Yu <i>et al.</i> (2018)	X		X	X	X
	Total	12	9	9	13	1

Respecto a los parámetros utilizados, los costos son tomados en cuenta en siete modelos, entre los que se destacan los costos de producción, de transporte y de recuperación; solo dos modelos consideran de forma explícita los costos de implementar ST; finalmente se destaca el tiempo de transporte, la demanda y el porcentaje de degradación de la calidad como parámetros a considerar en los modelos analizados.

Se resalta que en varios modelos una de las principales decisiones abordadas es el tamaño de lote que se va a manejar, esto permite establecer el nivel de granularidad óptimo cuando se adopta un sistema de trazabilidad [62], ayuda a limitar la retirada del producto y determina el costo específico de trazabilidad para una unidad trazable y, por ende, determinar de forma más específica los beneficios alcanzados por la implementación de sistemas de trazabilidad.

3.3.3.2. Modelos con programación no lineal

Las variables y los parámetros utilizados en los modelos de programación no lineal (PNL) se presentan en la Tabla X y en la Tabla XI, respectivamente. En los modelos que utilizan PNL se destaca el uso de variables binarias y variables de decisión: unidades enviadas y unidades producidas.

Tabla VIII. Variables de los modelos de programación lineal aplicados a CSA

Autores	Inventario	Und. enviadas a otro	No. lotes a producir	Variable binaria	Cantidad de residuos	Tamaño de lote	Und. recuperada	Und. a comprar	No. contenedores	Horas hombre contratada	No. etiquetas	No. elementos
[56] Thakur <i>et al.</i> (2010)				X								
[52] Rong <i>et al.</i> (2011)	X	X	X	X	X	X						
[57] Ahumada y Villalobos (2011)	X	Con calidad específica	Hectárea			Caja por hectárea	X	X	X	X		
[59] Píramuth <i>u et al.</i> (2013)		x				x						
[60] Yu y Nagurney (2013)		Flujos óptimos		Rutas								
[62] Aiello <i>et al.</i> (2015)		x	X			Lote de trazabilidad económica					x	x
[65] Moham med (2017)		x		X								
[12] Soto-Silva <i>et al.</i> (2017)		x		X				x				
Total	2	7	3	5	1	4	1	2	1	1	1	1

Respecto a los parámetros, los más utilizados son los costos, la demanda y el porcentaje de degradación de la calidad. Se evidencia que tanto las variables como los parámetros más utilizados en los modelos de programación lineal y no lineal son similares. Esto refleja el interés en los modelos de programación no lineal en el flujo de materiales y la necesidad de considerar la incertidumbre de las CS a la hora de modelar, con el ánimo de garantizar un mayor acercamiento a la realidad. Por otro lado, se evidencia una muy baja atención en los flujos de información.

3.3.3.3. Modelos con otra técnica de optimización

Las variables y los parámetros utilizados en los modelos que manejan técnicas de optimización diferentes a las clásicas (programación lineal y no lineal) se presentan en la Tabla XII y en la Tabla XIII, respectivamente. En los modelos planteados con otras técnicas se destaca que, a diferencia de los analizados anteriormente, se tiene en consideración el ST a utilizar como variable de decisión.

Al igual que en las técnicas anteriores, se hace evidente la relación entre los parámetros de calidad de la CS y la implementación del ST, ya que varios autores la relacionan en sus modelos [16], [47], [53], [59] y [11], dicha relación contribuye a mejorar el desempeño de la cadena, puesto que una de las claves de la gestión de la CSA es una visión integradora de logística y calidad; lo anterior resalta la necesidad de modelos combinados que estimen los cambios de calidad y la vida útil restante para optimizar las estrategias de gestión de la cadena [61].

Tabla IX. Parámetros de los modelos de programación lineal aplicados a CSA

Cp: Costo de producción, Ct: Costo de transporte, Ca: Costo de almacenamiento, Ce: Costo de empaque, Cr: Costo recuperación o eliminación, Cenf: Costo de enfriamiento, Cm: Costo mano de obra, Ctra: Costo tecnología de trazabilidad, Cis: Costo inspección y seguimiento, Ccl: Costo configuración de línea, % na: Porcentaje de no aceptación.

Autores	% de gradación calidad	mín. y max. de calidad	Tiempo de transporte	Demanda	Capacidad de producción	Costos	Cap. transporte	Cap. almacén	Tiempo de almacenamiento	Mano de obra disponible	No. de períodos	Tamaño de lote	Temperatura	Distancia de viaje	Retorno inversión	% integridad	Factor de vida útil	Multa por incumplimiento de calidad o demanda	Parámetros de volumen, humedad y peso del grano	Precio	Prob. contaminación o defecto	Disponibilidad información de traza	Responsabilidad civil
[56] Thakur <i>et al.</i> (2010)																	x	x					
[52] Rong <i>et al.</i> (2011)	Tasa de riesgo	x	máximo	x	x						x	x	x										
[57] Ahumada y Villalobos (2011)	%na		x	x	x					x	x						X	x		x			
[59] Piramuthu <i>et al.</i> (2013)	x		x				Cr														x	FI	x
[60] Yu y Nagurney (2013)	x		x				Totales, Cr																
[62] Aiello <i>et al.</i> (2015)	%na						Ct, Ctra														x		
[65] Mohammed (2017)				x	x		Ct, Ctra	x					x	x	x								
[12] Soto-Silva <i>et al.</i> (2017)				x			Admon, Ct	x	x														
Total	5	1	4	4	3	7	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1

Tabla X. Variables de los modelos de programación no lineal aplicados a CSA

Autores	Und. enviadas a otro eslabón	No. lotes a producir	Variable binaria	Tamaño de lote	Und. producidas	Tamaño de la unidad trazable
[16] Wang <i>et al.</i> (2010)	x	X	x	x		
[11] Gautam <i>et al.</i> (2017)			x			
[66] Dai <i>et al.</i> (2017)				x	x	x
[53] Yu <i>et al.</i> (2018)	x		x		x	
Total	2	1	3	2	2	1

Tabla XI. Parámetros de los modelos de programación no lineal aplicados a CSA

Cp: Costo de producción, Ct: Costo de transporte, Ca: Costo de almacenamiento, Ce: Costo de empaque,
 Cr: Costo recuperación o eliminación, Cenf: Costo de enfriamiento, Cm: Costo mano de obra,
 Ctra: Costo tecnología de trazabilidad, Cis: Costo inspección y seguimiento, Ccl: Costo configuración de línea,
 % na: Porcentaje de no aceptación.

Autores	% de gradación calidad	No. de camiones	Tiem. de transporte	Demanda	Cap. producción	Costos	Cap. transporte	Cap. Almacén	Tiem. Almacenamiento	Tamaño de lote	Distancia de viaje	Factor de vida útil	Multa por incumplimiento de calidad	Precio	Prob. contaminación o defecto	Disponibilidad información de traza	Responsabilidad civil	Prob. de recuperación	Cantidades producidas y enviadas	Promedio und. que deben ser trazadas
[16] Wang <i>et al.</i> (2010)	x			x	x	Ccl, Cr		x				x	x							
[11] Gautam <i>et al.</i> (2017)	x	x	x			Ct	x	x		x					x	x	x		x	
[66] Dai <i>et al.</i> (2017)					x	Cp, Cr, Cis				x				x				x		x
[53] Yu <i>et al.</i> (2018)	x				x	Cp, Ct, Cr, Ctra	x													
Total	3	1	2	3	2	4	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla XII. Variables de los modelos que utilizan otra técnica de optimización

Autores	Inventario	Und. recuperadas	ST a utilizar	Precio de venta	Vida útil faltante	Descuento óptimo
[58] Wang y Dong (2012)	x		X	X	x	x
[61] Hertog <i>et al.</i> (2014)	x		X		x	
[63] Dai <i>et al.</i> (2015)			X	X	x	
[42] Li y Wang (2015)	x		x	x		
Total	3	1	4	2	3	1

3.3.4. Modelado de trazabilidad con técnicas de simulación

El principal inconveniente de la mayoría de los modelos analíticos es la necesidad de cumplir numerosas restricciones antes de poder aplicarse en la práctica, mientras los enfoques matemáticos requieren demasiadas simplificaciones para modelar problemas en CS realistas [68]. Las herramientas de simulación a menudo se utilizan para respaldar la toma de decisiones de rediseño o gestión de la CS cuando existe incertidumbre logística [69]. En la Tabla XIV se distinguen cuatro tipos de simulación para la gestión de la CSA: (i) simulación en hoja de cálculo, (ii) dinámica de

Tabla XIII. Parámetros de los modelos que utilizan otra técnica de optimización

Cp: Costo de producción, Ct: Costo de transporte, Ca: Costo de almacenamiento, Ce: Costo de empaque,
 Cr: Costo recuperación o eliminación, Cenf: Costo de enfriamiento, Cm: Costo mano de obra,
 Ctra: Costo tecnología de trazabilidad, Cis: Costo inspección y seguimiento, Ccl: Costo configuración de línea,
 % na: Porcentaje de no aceptación.

Autores	% de gradación calidad Min. y max. de calidad	Demanda Cap. producción	Costos	Cap. almacén tiempo almacenamiento	No. de periodos	Tamaño de lote Temperatura	Factor de vida útil	Multa por incumplimiento de calidad	Precio	Prob. contaminación o defecto	Disponibilidad información de traza	Responsabilidad civil	Prob. de recuperación
[58] Wang y Dong (2012)	X	X	Totales		Intervalo	X	X						
[61] Hertog et al. (2014)		X	Ct	X	X	X	X						X
[63] Dai et al. (2015)	X	X	CtrC a			X				X	X	X	
[42] Li y Wang (2015)	X	X	Cp				X	Max., min.,					
Totales	3	2	3	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1

sistema (DS), (iii) simulación con eventos discretos (DEDS) y (iv) juegos de negocios [69]. La dinámica de sistema proporciona información cualitativa, mientras que la simulación con eventos discretos cuantifica los resultados e incorpora incertidumbres, y los juegos pueden educar y entrenar a los usuarios [68].

La simulación con eventos discretos permite modelar sistemas logísticos de forma más operativa y detallada [68] y con la dinámica de sistemas se puede evaluar la relación entre las variables y el comportamiento dependiente del tiempo con una visión a nivel estratégico [70]. Por su parte, la simulación basada en agentes proporciona una forma de examinar la estructura de la CS y los problemas de gestión, desde una visión que combina elementos de decisión tácticos [71]. En la Tabla XIV se muestran los modelos de trazabilidad bajo el enfoque de simulación, con una descripción y el objetivo principal de cada modelo.

De acuerdo con el análisis de los cuatro paradigmas de simulación de Van der Vorst *et al.* [69] en 2000 y Kleijnen [78] en 2003, se evidencia que la dinámica de sistemas es el paradigma más adecuado para abordar problemas estratégicos que contemplen la calidad de los productos para la CSA. También se destaca que las simulaciones de mayor frecuencia son las desarrolladas a través de las hojas de cálculo, dada su facilidad de uso.

Las medidas de desempeño de la CSA son un aspecto esencial en el modelado, tanto de simulación como de optimización, para el análisis de los sistemas de trazabilidad. Las Tablas XV, XVI y XVII presentan las medidas de desempeño utilizadas en los modelos de simulación planteados bajo dinámica de sistemas, simulación de eventos discretos y simulación por hojas de cálculo, respectivamente.

Tabla XIV. Modelos de simulación sobre la trazabilidad en las cadenas de suministro de alimentos

SC: simulación de hoja de cálculo, SD: dinámica de sistema, DEDS: simulación de sistema de evento discreto, SA: simulación por agentes

	Autores	Descripción	Propósito	Paradigma de simulación
[69]	Van der Vorst <i>et al.</i> (2000)	Modelo de simulación basado en Petri-nets para respaldar la toma de decisiones al rediseñar una CSA para refrigerados.	Se modela el comportamiento dinámico de la CSA, basado en conceptos de proceso de negocio, variables de diseño, indicadores de desempeño y entidad comercial.	DEDS
[68]	Van der Vorst <i>et al.</i> (2009)	Modelo de simulación integrado hacia el análisis de logística, sostenibilidad y calidad de los alimentos. Incorpora modelos de cambio de calidad e indicadores de sostenibilidad.	Se simula la CS como una red de agente: toman las decisiones (planificadores, puntos de venta, productores y sistemas de distribución), trabajos: actividades de la cadena y flujos: objetos móviles dentro del sistema.	DEDS con ALADIN
[72]	Saltini y Akkerman (2012)	Simulan diferentes escenarios para evaluar el impacto de la profundidad y la estrategia de un sistema de trazabilidad (se consideran tres ST) en la eficiencia de la producción y el retiro del producto (dispersión reducida de costo).	Simula dos crisis alimentarias: contaminación del grano (proveedor) y contaminación de un lote.	SC en Visual Basic
[73]	Herrera <i>et al.</i> (2014)	Modelo de simulación sobre el efecto de la implementación de tecnología de trazabilidad en la CS de frutas y sus relaciones con la capacidad de inversión y la calidad de un producto.	Se simulan tres empresas procesadoras de frutas bajo un enfoque transversal relacionado con la implementación de tecnología, identifica cuatro efectos principales que determinan el comportamiento dinámico del sistema.	SD
[74]	Ge <i>et al.</i> (2015)	Modelo analítico y modelo de simulación de la CS de trigo con el objetivo final de identificar estrategias de prueba de calidad efectivas.	Se modelan a agricultores y manipuladores de carga como individuos racionales y de aprendizaje que toman decisiones basados en sus propias experiencias, así como en las experiencias de otros a su alrededor.	SA
[75]	Herrera <i>et al.</i> (2018)	Modelo de simulación sobre el comportamiento de la capacidad de producción, la trazabilidad y la recuperación en la CS de ciclo cerrado.	Se representan las relaciones entre las capacidades de trazabilidad y recuperación y sus efectos en el control de calidad.	SD
[76]	La Scalia (2019)	Simulan la incidencia económica y ambiental de los sistemas de gestión de almacén, bajo la simulación de tres escenarios de precio, basados en la vida útil del producto y su gestión a través de la trazabilidad.	Simulan dos estrategias de almacén en la CS de la fresa: primero en vender, primero en salir y primero en entrar, primero en salir, en tres escenarios de precio diferentes.	SC Simulación de Monte Carlo
[77]	Gunawan <i>et al.</i> (2019)	Simulan un modelo de costo-beneficio basado en un enfoque dinámico para determinar la influencia de la mejora de un sistema de trazabilidad en la industria de alimentos hacia la eficacia y la eficiencia del proceso de Retiro.	Simulan tres escenarios: sistemas de trazabilidad en empresas de pequeña, mediana y gran escala, utilizando indicadores de precisión, amplitud y profundidad.	SD

Tabla XV. Medidas de desempeño de los modelos de dinámica de sistemas

Autores	Capacidad de recuperación	Relación costo y beneficio	Calidad del producto	Inversión en trazabilidad
[73] Herrera <i>et al.</i> (2014)			x	x
[75] Herrera <i>et al.</i> (2018)	x		x	x
[77] Gunawan <i>et al.</i> (2019)		x		
Total	1	1	2	2

Tabla XVI. Medidas de desempeño de los modelos de simulación de eventos discretos

Autores	Impacto ambiental	Costos logísticos	Calidad del producto	Disponibilidad del producto	Precio	Rendimiento de la cadena
[69] Van der Vorst <i>et al.</i> (2000)			X	X	X	X
[68] Van der Vorst <i>et al.</i> (2009)	Emissiones CO2 y uso de energía	X	X			
Total	1	1	2	1	1	1

Tabla XVII. Medidas de desempeño de los modelos de simulación por hojas de cálculo

Autor	Tamaño del lote	Capacidad de recuperación	Número de lotes	Impacto ambiental	Recuperación de la inversión
[10] Saltini y Akkerman (2012)	X	X	X		
[76] La Scalia (2019)				Emissiones CO2	X
Total	1	1	1	1	1

Se destacan los estudios en los que son abordadas las medidas relacionadas con el análisis de la capacidad de recuperación del sistema de trazabilidad, lo cual refleja una preocupación en las investigaciones por la sostenibilidad del sistema de producción y recuperación a lo largo de las CSA. En este sentido, es posible que estas medidas conduzcan a entender mejor el concepto y la dinámica de la seguridad alimentaria en las CS.

4. Trabajo futuro y gaps identificados

Se evidencia que el tema de trazabilidad en la CSA ha tenido una dinámica de publicación creciente y un interés por la comunidad académica y empresarial. Varios autores relacionan la trazabilidad y la calidad, mantener una alta calidad en alimentos perecederos es de vital importancia para el desempeño de la CSA [52].

En cuanto a la implementación de TS desde la parte económica, se destaca la necesidad de desarrollar modelos que permitan la evaluación y comparación de metodologías en un marco unificado, tanto desde el punto de vista operativo como económico, considerando costos y beneficios deri-

vados de la introducción de un TS optimizado [4], en dicha optimización se debe considerar la oportunidad de aumentar la profundidad del TS [10], para esto se sugiere la implementación de un sistema de comunicación e intercambio de información en toda la CSA que conduzca a un intercambio de datos rápido y eficiente [79]; además, algunos autores mencionan la necesidad de investigaciones adicionales sobre trazabilidad centradas en cuestiones tales como: mejorar los aspectos tecnológicos de los sistemas de trazabilidad, el vínculo entre el sistema de trazabilidad y las unidades de producción de alimentos, la estandarización del intercambio de información, la integración de la trazabilidad en la gestión logística y el desarrollo de estrategias de creación de conciencia, y la eficacia de la comunicación de la información de trazabilidad a los consumidores y otras partes interesadas [8]; se considera que dichos aspectos pueden ser considerados en los modelos de optimización y en los de simulación, dependiendo del enfoque dado.

Por otro lado, en relación con los alimentos procesados, a pesar de contar con diferentes métodos para implementar la trazabilidad en el procesamiento, considerando el reto que implica la mezcla de lotes, se resalta la necesidad de evaluar los escenarios de aplicación específicos en el procesamiento de alimentos para mejorar la granularidad [80]; en este mismo sentido, se requiere la formulación de políticas de mezcla desde la producción hasta la distribución y el desarrollo de modelos que permitan determinar el tamaño óptimo del lote, lo cual en conjunto ayudará a reducir la dispersión general del lote [4]. Adicionalmente, toma relevancia considerar modelos de trazabilidad para múltiples productos y las interacciones entre estos [52]; así como proponer modelos con degradación de calidad para múltiples productos relacionados, por ejemplo frutas y verduras, incluyendo parámetros variables como fluctuación de la temperatura [68], [81] y humedad relativa en cambios de pisos térmicos [82].

Existe una clara tendencia por el consumo de productos frescos con alta calidad, por lo que los eslabones de la cadena deberán prestar atención a la vida útil del producto, para esto se deberán considerar, en el modelado, los beneficios potenciales que los productores o fabricantes podrían obtener al ofrecer una vida útil más larga [16], con la implementación de ST en términos de crisis de seguridad y eficiencia de producción [72]. Considerar los beneficios potenciales que los fabricantes de alimentos podrían obtener al proporcionar una vida útil más larga del producto es un tema importante y desafiante para la investigación futura, ya que bajo esta circunstancia el modelo realmente considera el problema desde la perspectiva de la cadena de suministro completa [16]. De acuerdo con esto, varios modelos buscan maximizar los beneficios de la trazabilidad, pero se deben cuantificar diferentes medidas de desempeño en la CSA, lo que da origen a modelos multiobjetivo, un trabajo de investigación futuro.

De igual forma, se requieren modelos con enfoques holísticos para el diseño y la gestión de la cadena de suministro de alimentos frescos [81], que tengan en consideración los efectos de una decisión de un proveedor en la responsabilidad y el funcionamiento con otro eslabón, a través de mecanismos de participación al implantar ST [63]. En el diseño de la capacidad de seguimiento en la CSA influyen factores como la recuperación de los desperdicios [75] y la evaluación de los valores de granularidad para mejorar el sistema de trazabilidad [83], también se sugiere trabajar en modelos que permitan optimizar los esfuerzos conjuntos de retirada de productos de la cadena de suministro y la reducción de precio, utilizando costos de retiro compartidos [84].

Las relaciones complejas entre eslabones y variables conllevan a la creación de modelos integrados, planeación estratégica, operativa y táctica para dar solución a los principales problemas de la CSA, modelos que aunque pueden ser robustos y complejos, facilitan la gestión [16]. Los documentos se enfocan especialmente en decisiones tácticas y operativas, las decisiones estratégicas son menos consideradas, por lo tanto, es un campo de investigación que requiere mayor atención [81]. Se menciona la necesidad de desarrollar un marco de optimización y planificación capaz de tener en cuenta explícitamente la variable “tiempo”, con el objetivo de seguir de cerca la evolución y los cambios en la línea de producción e ir actualizando y adaptando dinámicamente las estrategias de planificación a los cambios [4]. En este sentido, se destaca el uso de la dinámica de sistemas como técnica de simulación para dar soporte a los tomadores de decisiones, ya que desarrolla composiciones entre variables de forma sistémica para la toma de decisiones integrales y estratégicas de la CSA, que permite el análisis del comportamiento a través del tiempo [73].

Los principales problemas modelados han sido de planificación, asignación y transporte. Sin embargo, la adición constante de nuevos parámetros, condiciones y variables proponen la integración de métodos complementarios como optimización y simulación, o el cambio de perspectiva de un enfoque de monocriterio a un enfoque multicriterio, relacionado múltiples niveles o eslabones [12]. A pesar de que este cambio se ha evidenciado en las últimas publicaciones, se considera que aún quedan investigaciones por desarrollar a través de modelos multiobjetivo.

Recientemente, la evolución de la logística en el contexto de la industria 4.0 requiere del procesamiento de grandes volúmenes de información con múltiples atributos cuantitativos y cualitativos. En este contexto, los sistemas de trazabilidad cumplen un papel esencial en la sincronización de los autores y el mejoramiento del desempeño de la CSA. Desde la revisión de literatura se ha evidenciado la carencia de estudios que vinculen el modelado de los sistemas de trazabilidad y la logística 4.0, convirtiéndose en una oportunidad para futuras investigaciones. En este mismo contexto se sugiere considerar en futuras investigaciones el uso de tecnologías novedosas, como inteligencia artificial, Big Data y Blockchain para obtener mejoras efectivas en el desempeño de la trazabilidad en el procesamiento de alimentos [80], además, la creciente difusión de nuevas tecnologías para la identificación y la detección automáticas, junto con la disponibilidad de nuevos modelos computacionales y de simulación y de nuevos sistemas mecánicos para la segregación de lotes abren el camino para nuevas soluciones capaces de garantizar un mayor nivel de control de la cadena de suministro [4].

Tal vez uno de los focos de estudios relevantes es la necesidad de incluir la sostenibilidad en la gestión de la CSA, considerando impactos ambientales y ecológicos, como el consumo y el agotamiento de los recursos hídricos o la pérdida de energía, junto con las relaciones con trazabilidad [76]. Considerar la sostenibilidad en la gestión de la CS requiere incluir no solo aspectos ecológicos y económicos sino también sociales, uno de ellos: la seguridad alimentaria, donde la trazabilidad resulta fundamental. En conclusión, para futuras investigaciones también se sugieren modelos de gestión logística sostenible.

La mayoría de los modelos revisados utilizan parámetros determinísticos, sin embargo, se hace necesario el desarrollo de modelos de optimización que aborden la incertidumbre y la variabilidad del flujo de material en la CSA, con un enfoque estocástico para evitar sesgos con la realidad [53].

Se debe diseñar e implementar sistemas de trazabilidad que permitan el acceso eficiente a la información y que contemplen las fuertes asimetrías entre los eslabones, ya que estos generan escenarios con alto grado de incertidumbre, lo cual produce la necesidad de modelos que contemplen la información difusa en los ST [53]. Para investigaciones futuras que aborden la incertidumbre en los parámetros establecidos, como la demanda o el porcentaje de integridad, una opción es utilizar modelos de programación estocástico [65]. Bajo este mismo enfoque y en relación con la representación de la CSA como una red, se puede considerar la opción de incluir en el modelo la incertidumbre de la oferta [12] y la variabilidad de la demanda, junto con la volatilidad del precio y la confiabilidad de la entrega [60]. Se requiere el uso de tecnologías de trazabilidad de alimentos más efectivas y económicas que faciliten la integración de datos de trazabilidad estáticos y dinámicos y que garanticen la continuidad del flujo de información dentro de la cadena de suministro [8].

En síntesis, se observa la necesidad de desarrollar modelos que aborden la variabilidad y la incertidumbre de los sistemas a través de los parámetros estocásticos; modelos que apoyen la toma de decisiones estratégicas, donde se resalta la importancia de la dinámica de sistemas; desarrollo e implementación de tecnología con un enfoque sistémico que permita mejorar las características de rastreo y seguimiento; desarrollo de modelos que integren métodos complementarios o utilización de enfoques multiobjetivo, multiproducto; modelos y mecanismos para la gestión de datos orientados al análisis integral de las relaciones y los flujos entre los actores de la cadena; desarrollo de modelos que permitan el análisis del comportamiento de la implementación tecnológica en los procesos de trazabilidad; desarrollo de modelos de participación que consideren los efectos de las decisiones de un eslabón en la responsabilidad y el funcionamiento del otro, y desarrollo de modelos de gestión logística sostenible. En este sentido, una intervención sistémica basada en modelos de simulación estratégicos puede mejorar el proceso de toma de decisiones en el largo plazo de los sistemas de trazabilidad adoptados.

Referencias

- [1] K. M. Karlsen, and P. Olsen, "Validity of method for analysing critical traceability points", *Food Control*, vol. 22, no. 8, pp. 1209-1215, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.01.020> ↑144, 151
- [2] M. N. Faisal, and F. Talib, "Implementing traceability in Indian food-supply chains: An interpretive structural modeling approach", *J. Foodserv. Bus. Res.*, vol. 19, no. 2, pp. 171-196, 2016. <https://doi.org/10.1080/15378020.2016.1159894> ↑144, 145, 151
- [3] M. Thakur, and C. R. Hurburgh, "Framework for implementing traceability system in the bulk grain supply chain", *J. Food Eng.*, vol. 95, no. 4, pp. 617-626, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.06.028> ↑144, 145
- [4] F. Dabbene, P. Gay, and C. Tortia, "Traceability issues in food supply chain management: A review", *Biosyst. Eng.*, vol. 120, pp. 65-80, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.09.006> ↑144, 145, 149, 150, 151, 153, 155, 165, 166
- [5] J. A. Alfaro, and L. A. Rábade, "Traceability as a strategic tool to improve inventory management: A case study in the food industry", *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 118, no. 1, pp. 104-110, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.08.030> ↑145, 151
- [6] P. Olsen, and M. Borit, "How to define traceability", *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 29, no. 2, pp. 142-150, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.10.003> ↑145, 149, 150
- [7] T. A. McMeekin et al., "Information systems in food safety management", *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 112, no. 3, pp. 181-194, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2006.04.048> ↑145
- [8] T. Bosona, and G. Gebresenbet, "Food traceability as an integral part of logistics management in food and agricultural supply chain", *Food Control*, vol. 33, no. 1, pp. 32-48, 2013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.>

- [foodcont.2013.02.004](#) ↑ [145](#), [149](#), [150](#), [153](#), [155](#), [165](#), [167](#)
- [9] X. Wang, D. Li, and C. O'Brien, "Optimisation of traceability and operations planning: An integrated model for perishable food production", *Int. J. Prod. Res.*, vol. 47, no. 11, pp. 2865-2886, 2009. <https://doi.org/10.1080/00207540701725075> ↑ [145](#), [153](#), [154](#), [155](#), [156](#), [157](#)
- [10] R. Saltini, and R. Akkerman, "Testing improvements in the chocolate traceability system: Impact on product recalls and production efficiency", *Food Control*, vol. 23, no. 1, pp. 221-226, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.07.015> ↑ [145](#), [164](#), [165](#)
- [11] R. Gautam, A. Singh, K. Karthik, S. Pandey, F. Scrimgeour, and M. K. Tiwari, "Traceability, using RFID and its formulation for a kiwifruit supply chain", *Comput. Ind. Eng.*, vol. 103, pp. 46-58, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.09.007> ↑ [145](#), [155](#), [156](#), [157](#), [158](#), [159](#), [160](#), [161](#)
- [12] W. E. Soto-Silva, M. C. González-Araya, M. A. Oliva-Fernández, and L. M. Plà-Aragonés, "Optimizing fresh food logistics for processing: Application for a large Chilean apple supply chain", *Comput. Electron. Agric.*, vol. 136, pp. 42-57, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.02.020> ↑ [145](#), [155](#), [156](#), [157](#), [158](#), [159](#), [160](#), [166](#), [167](#)
- [13] J. A. Orjuela Castro, "Incidencia del diseño de la cadena de suministro alimentaria en el equilibrio de flujos logísticos", Universidad Nacional de Colombia, 2018. ↑ [145](#)
- [14] B. Kitchenham, "Procedures for Performing Systematic Reviews", Technical Report TR/SE- 0401, Department of Computer Science, Keele University, UK, 2004. ↑ [146](#)
- [15] D. L. Rincón, J. E. Fonseca y J. A. Orjuela-Castro, "Hacia un marco conceptual común para la trazabilidad en la cadena de suministro de alimentos", *Ingeniería*, vol. 22, no. 2, pp. 161-189, 2017. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2017.2.a01> ↑ [146](#), [149](#), [150](#)
- [16] X. Wang, D. Li, C. O'Brien, and Y. Li, "A production planning model to reduce risk and improve operations management", *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 124, no. 2, pp. 463-474, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.12.009> ↑ [146](#), [153](#), [154](#), [156](#), [157](#), [158](#), [159](#), [160](#), [161](#), [165](#), [166](#)
- [17] J. E. Hobbs, "Transaction costs and slaughter cattle procurement: Processors' selection of supply channels", *Agribusiness*, vol. 12, no. 6, pp. 509-523, 1996. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6297\(199611/12\)12:6<509::AID-AGR2>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6297(199611/12)12:6<509::AID-AGR2>3.0.CO;2-7) ↑ [148](#)
- [18] Food Chain Strategy and Food Standards Agency, "Traceability in the Food Chain. A preliminary study", Food Standard Agency, 2002. ↑ [149](#)
- [19] E. Golan *et al.*, "Traceability in the US food supply: Economic theory and industry studies", Agricultural Economic Report No. 830, 2004. ↑ [149](#), [151](#)
- [20] K. M. Karlsen, B. Dreyer, P. Olsen, and E. O. Elvevoll, "Granularity and its role in implementation of seafood traceability", *J. Food Eng.*, vol. 112, no. 1-2, pp. 78-85, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.025> ↑ [149](#), [151](#)
- [21] Icontec, "NTC-ISO 9000 Sistemas de Gestión de la Calidad - fundamentos y vocabulario", *Icontec*, 2015. ↑ [149](#), [150](#)
- [22] M. Bertolini, M. Bevilacqua, and R. Massini, "FMCA approach to product traceability in the food industry", *Food Control*, vol. 17, no. 2, pp. 137-145, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2004.09.013> ↑ [149](#)
- [23] P. Olsen, and M. Aschan, "Reference method for analyzing material flow, information flow and information loss in food supply chains", *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 21, no. 6, pp. 313-320, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.03.002> ↑ [149](#), [150](#)
- [24] T. Kelepouris, K. Pramataris, and G. Doukidis, "RFID-enabled traceability in the food supply chain", *Ind. Manag. Data Syst.*, vol. 107, no. 2, pp. 183-200, 2007. <https://doi.org/10.1108/02635570710723804> ↑ [149](#)
- [25] S. Tamayo, T. Monteiro, and N. Sauer, "Deliveries optimization by exploiting production traceability information", *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 22, no. 4-5, pp. 557-568, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2009.02.007> ↑ [149](#)
- [26] A. Regattieri, M. Gamberi, and R. Manzini, "Traceability of food products: General framework and experimental evidence", *J. Food Eng.*, vol. 81, no. 2, pp. 347-356, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.10.032> ↑ [149](#), [150](#)
- [27] B. Manos, and I. Manikas, "Article information: Traceability in the greek fresh produce sector: drivers and constraints", *Br. Food J.*, vol. 112, no. 6, pp. 640-652, 2010. <https://doi.org/10.1108/00070701011052727> ↑ [149](#)
- [28] A. Bechini, M. Cimino, F. Marcelloni, and A. Tomasi, "Patterns and technologies for enabling supply chain

- traceability through collaborative e-business”, *Inf. Softw. Technol.*, vol. 50, no. 4, pp. 342-359, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2007.02.017> ↑149
- [29] EC, “Commission Regulation (EC) No 852/2004 of 29 April 2004 on the hygiene of foodstuffs”, European Parliament and of the Council, 2004. ↑150
- [30] J. van der Vorst, A. Beulens, and P. van Beek, “Innovations in logistics and ICT in food supply chain networks”, *Innovations in Agri-Food Systems: Product Quality and Consumer Acceptance*, Wageningen Academic Publishers, pp. 245-291, 2005. ↑150, 153
- [31] L. A. Rábade, and J. A. Alfaro, “Buyer-supplier relationship’s influence on traceability implementation in the vegetable industry”, *J. Purch. Supply Manag.*, vol. 12, no. 1, pp. 39-50, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2006.02.003> ↑150
- [32] D. Folinas, I. Manikas, and B. Manos, “Traceability data management for food chains”, *Br. Food J.*, vol. 108, no. 8, pp. 622-633, 2006. <https://doi.org/10.1108/00070700610682319> ↑150
- [33] M. Canavari, R. Centonze, M. Hingley, and R. Spadoni, “Traceability as part of competitive strategy in the fruit supply chain”, *Br. Food J.*, vol. 112, no. 2, pp. 171-186, 2010. <https://doi.org/10.1108/00070701011018851> ↑150
- [34] W. van Rijswijk, L. J. Frewer, D. Menozzi, and G. Faioli, “Consumer perceptions of traceability: A cross-national comparison of the associated benefits”, *Food Qual. Prefer.*, vol. 19, no. 5, pp. 452-464, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2008.02.001> ↑150
- [35] S. Khan, A. Haleem, M. I. Khan, M. H. Abidi, and A. Al-Ahmari, “Implementing traceability systems in specific supply chain management (SCM) through critical success factors (CSFs)”, *Sustain.*, vol. 10, no. 1, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10010204> ↑150, 151
- [36] F. Dabbene, and P. Gay, “Food traceability systems: Performance evaluation and optimization”, *Comput. Electron. Agric.*, vol. 75, no. 1, pp. 139-146, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.10.009> ↑150
- [37] J. van der Vorst, “Performance levels in food traceability and the impact on chain design: Results of an international benchmark study”, *Dynamics in Chains and Networks*, Wageningen Academic Press, 2004. ↑150
- [38] M. Salamapasis, D. Tektonidis, and E. P. Kalogianni, “TraceALL: A semantic web framework for food traceability systems”, *J. Syst. Inf. Technol.*, vol. 14, no. 4, pp. 302-317, 2012. <https://doi.org/10.1108/13287261211279053> ↑152
- [39] J. Hu, X. Zhang, L. M. Moga, and M. Neculita, “Modeling and implementation of the vegetable supply chain traceability system”, *Food Control*, vol. 30, no. 1, pp. 341-353, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.06.037> ↑152
- [40] J. T. Mgonja, P. Luning, and J. van Der Vorst, “Diagnostic model for assessing traceability system performance in fish processing plants”, *J. Food Eng.*, vol. 118, no. 2, pp. 188-197, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.04.009> ↑152
- [41] T. Pizzuti, and G. Mirabelli, “The Global Track&Trace System for food: General framework and functioning principles”, *J. Food Eng.*, vol. 159, pp. 16-35. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.03.001> ↑152
- [42] W. Liang, J. Cao, Y. Fan, K. Zhu, and Q. Dai, “Modeling and implementation of cattle/beef supply chain traceability using a distributed RFID-based framework in China”, *PLoS One*, vol. 10, no. 10, pp. 1-17, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139558> ↑152, 158, 161
- [43] R. Y. Chen, “Autonomous tracing system for backward design in food supply chain”, *Food Control*, vol. 51, pp. 70-84, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.11.004> ↑152
- [44] C. N. Verdouw, J. Wolfert, A. J. M. Beulens, and A. Rialland, “Virtualization of food supply chains with the internet of things”, *J. Food Eng.*, vol. 176, pp. 128-136, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.11.009> ↑152
- [45] H. M. Kim, and M. Laskowski, “Towards an ontology-driven blockchain design for supply chain provenance”, *Intell. Syst. Accounting, Financ. Manag.*, vol. 25, no. 1, pp. 18-27, 2018. <https://doi.org/10.1002/isaf.1424> ↑152
- [46] T. M. Fernández-Caramés, and P. Fraga-Lamas, “A Review on the Use of Blockchain for the Internet of Things”, *IEEE Access*, vol. 6, pp. 32979-33001. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2842685> ↑152
- [47] F. Dabbene, P. Gay, and N. Sacco, “Optimisation of fresh-food supply chains in uncertain environments, Part I: Background and methodology”, *Biosyst. Eng.*, vol. 99, no. 3, pp. 348-359, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.11.011> ↑151, 153, 154, 159
- [48] X. Zhang, J. Zhang, F. Liu, Z. Fu, and W. Mu, “Strengths and limitations on the operating mechanisms of tracea-

- bility system in agro food, China”, *Food Control*, vol. 21, no. 6, pp. 825-829, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2009.10.015> ↑151
- [49] A. Chaudhuri, S. Srivastava, R. K. Srivastava, and Z. Parveen, “Risk propagation and its impact on performance in food processing supply chain: A fuzzy interpretive structural modeling based approach”, *J. Model. Manag.*, vol. 11, no. 2, pp. 660-693, 2016. <https://doi.org/10.1108/JM2-08-2014-0065> ↑151, 156
- [50] M. Balaji, and K. Arshinder, “Modeling the causes of food wastage in Indian perishable food supply chain”, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 114, pp. 153-167, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.07.016> ↑151
- [51] R. Shankar, R. Gupta, and D. K. Pathak, “Modeling critical success factors of traceability for food logistics system”, *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 119, pp. 205-222, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.03.006> ↑151
- [52] A. Rong, R. Akkerman, and M. Grunow, “An optimization approach for managing fresh food quality throughout the supply chain”, *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 131, no. 1, pp. 421-429, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.11.026> ↑153, 154, 156, 157, 158, 159, 160, 164, 165
- [53] J. Yu, M. Gan, S. Ni, and D. Chen, “Multi-objective models and real case study for dual-channel FAP supply chain network design with fuzzy information”, *J. Intell. Manuf.*, vol. 29, no. 2, pp. 389-403, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1115-8> ↑153, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 166, 167
- [54] C. Dupuy, V. Botta-Genoulaz, and A. Guinet, “Batch dispersion model to optimise traceability in food industry”, *J. Food Eng.*, vol. 70, no. 3, pp. 333-339, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.074> ↑153, 154
- [55] D. Li, D. Kehoe, and P. Drake, “Dynamic planning with a wireless product identification technology in food supply chains”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 30, no. 9-10, pp. 938-944, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0066-1> ↑154
- [56] M. Thakur, L. Wang, and C. R. Hurburgh, “A multi-objective optimization approach to balancing cost and traceability in bulk grain handling”, *J. Food Eng.*, vol. 101, no. 2, pp. 193-200, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.07.001> ↑153, 154, 156, 157, 158, 159, 160
- [57] O. Ahumada, and J. R. Villalobos, “Operational model for planning the harvest and distribution of perishable agricultural products”, *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 133, no. 2, pp. 677-687, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.05.015> ↑154, 156, 157, 158, 159, 160
- [58] X. Wang, and D. Li, “A dynamic product quality evaluation based pricing model for perishable food supply chains”, *Omega*, vol. 40, no. 6, pp. 906-917, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2012.02.001> ↑154, 156, 157, 158, 161
- [59] S. Piramuthu, P. Farahani, and M. Grunow, “RFID-generated traceability for contaminated product recall in perishable food supply networks”, *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 225, no. 2, pp. 253-262, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.09.024> ↑154, 156, 157, 158, 159, 160
- [60] M. Yu, and A. Nagurney, “Competitive food supply chain networks with application to fresh produce”, *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 224, no. 2, pp. 273-282, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.07.033> ↑154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 167
- [61] M. Hertog, I. Uysal, U. McCarthy, B. M. Verlinden, and B. M. Nicolai, “Shelf life modelling for first-expired-first-out warehouse management”, *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 372, no. 2017. <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0306> ↑154, 156, 157, 158, 159, 161
- [62] G. Aiello, M. Enea, and C. Muriana, “The expected value of the traceability information”, *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 244, no. 1, pp. 176-186, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.01.028> ↑154, 156, 157, 158, 159, 160
- [63] H. Dai, M. M. Tseng, and P. H. Zipkin, “Design of traceability systems for product recall”, *Int. J. Prod. Res.*, vol. 53, no. 2, pp. 511-531, 2015. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.955922> ↑155, 156, 157, 158, 161, 165
- [64] D. Li, and X. Wang, “Dynamic supply chain decisions based on networked sensor data: an application in the chilled food retail chain”, *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, no. 17, pp. 5127-5141, 2017. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1047976> ↑155, 156, 157
- [65] A. Mohammed, Q. Wang, and X. Li, “A study in integrity of an RFID-monitoring HMSC” *Int. J. Food Prop.*, vol. 20, no. 5, pp. 1145-1158, 2017. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1203933> ↑153, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 167
- [66] J. Dai, L. Fan, N. Lee, and J. Li, “Joint optimisation of tracking capability and price in a supply chain with

- endogenous pricing”, *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, no. 18, pp. 5465-5484, 2017. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1321800> ↑155, 156, 157, 158, 160, 161
- [67] D. M. Sourza Monteiro, “Theoretical and Empirical Analysis of the Economics of Traceability Adoption in Food Supply Chains”, Doctoral Dissertations Available from Proquest, 2007. ↑153, 157
- [68] J. van der Vorst, S.-O. Tromp, and D.-J. van der Zee, “Simulation modelling for food supply chain redesign: integrated decision making on product quality, sustainability and logistics”, *Int. J. Prod. Res.*, vol. 47, no. 23, pp. 6611-6631, 2009. <https://doi.org/10.1080/00207540802356747> ↑161, 162, 163, 164, 165
- [69] J. van der Vorst, A. J. M. Beulens, and P. van Beek, “Modelling and simulating multi-echelon food systems”, *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 122, pp. 354-366, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00238-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00238-6) ↑156, 161, 162, 163, 164
- [70] J. Sterman, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, McGraw Hill, 2000. ↑162
- [71] L. A. Santa-Eulalia, G. Halladjian, S. D’Amours, and J.-M. Frayret, “Integrated methodological frameworks for modeling agent-based advanced supply chain planning systems: A systematic literature review”, *J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 4, no. 4, pp. 624-668, 2011. <http://dx.doi.org/10.3926/jiem.326> ↑162
- [72] R. Saltini, R. Akkerman, and S. Frosch, “Optimizing chocolate production through traceability: A review of the influence of farming practices on cocoa bean quality”, *Food Control*, vol. 29, no. 1, pp. 167-187, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.05.054> ↑163, 165
- [73] M. M. Herrera y J. A. Orjuela, “Perspectiva de trazabilidad en la cadena de suministros de frutas: un enfoque desde la dinámica de sistemas”, *Ingeniería*, vol. 19, no. 2, pp. 236-247, 2014. ↑163, 164, 166
- [74] H. Ge, R. Gray, and J. Nolan, “Agricultural supply chain optimization and complexity: A comparison of analytic vs simulated solutions and policie”, *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 159, pp. 208-220, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.09.023> ↑163
- [75] M. M. Herrera, L. Vargas, and D. Contenido, “Modeling the traceability and recovery processes in the closed-loop supply chain and their effects”, J. Figueroa-García, E. López-Santana, J. Rodríguez-Molano (eds), *Applied Computer Sciences in Engineering*, CCIS, vol. 915, pp. 328-339, Springer, 2018. ↑163, 164, 165
- [76] G. La Scalia, R. Micale, P. P. Miglietta, and P. Toma, “Reducing waste and ecological impacts through a sustainable and efficient management of perishable food based on the Monte Carlo simulation”, *Ecol. Indic.*, vol. 97, pp. 363-371, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.041> ↑163, 164, 166
- [77] I. Gunawan, I. Vanany, and E. Widodo, “Cost-benefit model in improving traceability system: Case study in Indonesian bulk-liquid industry”, *Supply Chain Forum*, vol. 20, no. 2, pp. 145-157, 2019. <https://doi.org/10.1080/16258312.2019.1570671> ↑163, 164
- [78] J. Kleijnen, and M. Smits, “Performance metrics in supply chain management”, *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 54, no. 5, pp. 507-514, 2003. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601539> ↑162
- [79] I. Anica-Popa, “Food traceability systems and information sharing in food supply chain ionuț Anica-Popa”, *Manag. Mark. Challenges Knowl. Soc.*, vol. 7, no. 4, pp. 749-758, 2012. ↑165
- [80] J. Qian, B. Dai, B. Wang, Y. Zha, and Q. Song, “Traceability in food processing: Problems, methods, and performance evaluations - a review”, *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 0, no. 0, pp. 1-14, 2020. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1825925> ↑165, 166
- [81] W. E. Soto-Silva, E. Nadal-Roig, M. C. González-Araya, and L. M. Pla-Aragones, “Operational research models applied to the fresh fruit supply chain”, *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 251, no. 2, pp. 345- 355, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.046> ↑165, 166
- [82] L. A. Sanabria, A. M. Peralta, and J. A. Orjuela, “Modelos de localización para cadenas agroalimentarias pederas: una revisión al estado del arte”, *Ingeniería*, vol. 22, no. 1, pp. 23-45, 2017. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2017.1.a04> ↑165
- [83] J. Qian, B. Fan, X. Wu, S. Han, S. Liu, and X. Yang, “Comprehensive and quantifiable granularity: A novel model to measure agro-food traceability”, *Food Control*, vol. 74, pp. 98-106, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.11.034> ↑165
- [84] B. Dai, Y. Nu, X. Xie, and J. Li, “Interactions of traceability and reliability optimization in a competitive supply chain with product recall”, *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 290, no. 1, pp. 116-131, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.08.003> ↑165

Tatiana Maya-Trujillo

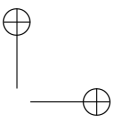
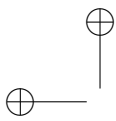
Estudiante de la Maestría en Ingeniería Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia). Asistente en la Maestría en Ciencias de la información y las Comunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y miembro del grupo de investigación “GYCALYT” (Grupo de investigación en cadenas de abastecimiento, logística y trazabilidad).

Javier Arturo Orjuela-Castro

Doctor en Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia; Magíster en Investigación de Operaciones y Estadística, Universidad Tecnológica de Pereira; Ingeniero Industrial, Ingeniero de Alimentos, Docente e Investigador en Logística y Cadenas de Suministro de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Director del Grupo de Investigación GICALYT (Grupo de investigación en cadenas de abastecimiento, logística y trazabilidad).
Correo electrónico: jorjuela@udistrital.edu.co

Milton M. Herrera



PhD in Model-based Public Planning, Design Policy and Management, de la Universidad de Palermo (Italia); Doctor en Modelado en Política y Gestión Pública de la Universidad Jorge Tadeo Lozano (Colombia), Magíster en Ingeniería Industrial e Ingeniero de Producción, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Profesor Asistente de Producción y Logística del Centro de Investigaciones de Ciencias Económicas de la Universidad Militar Nueva Granada; investigador del grupo GICALYT (Grupo de investigación en cadenas de abastecimiento, logística y trazabilidad).
Correo electrónico: milton.herrera@unimilitar.edu.co



Research

The Distribution System and the Efficacy in Children Food Assistance Programs. The Case of Bienestarina-Colombia

El sistema de distribución y la eficacia en programas de asistencia nutricional infantil. Caso Bienestarina - Colombia

Feizar Rueda-Velasco* ¹, **Wilson Adarme-Jaimes**², **Jesús González-Feliu** ³

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá-Colombia), ²Universidad Nacional de Colombia (Bogotá- Colombia), ³Centre de Recherche en Intelligence et Innovation Managériales, Excelia Group (La Rochelle, France)

correspondence e-mail: fjruedav@udistrital.edu.co

Recibido: 20/11/2019. Modificado: 28/04/2021. Aceptado: 30/05/2021.

Abstract

Context: Food Assistance Programs (FAP) produce and distribute food to fight malnutrition on vulnerable populations. FAP distribution system allows connecting the supply with the vulnerable population demand. This research explores the links and relations between the distribution system components and the FAP's efficacy. The research is focused on a FAP called "Bienestarina Más®" in Colombia, highly associated with childhood welfare.

Method: The relations between the distribution system and program efficacy is analyzed comparing real FAP delivery data and official population statistics. The capabilities of the information systems are compared with the FAP scope using user manuals and official reports.

Results: The analysis shows improvement potential in the coverage of the Colombian South-West region, gaps between offer and demand, especially when the study evaluates disaggregated data. Also, the research found a lack of coherence in the freight flows and the difference between FAP's scope and the information systems used for user registration-recognition and freight traceability.

Conclusions: The research shows a lack of coordination between FAP access procedures, the population social profiles, the freight flows allocations and the scope of the information technologies. The coordination failures affect the efficacy of the program the childhood population attention.

Keywords: Food Assistance Program, Distribution System, Coordination

Acknowledgements: COLCIENCIAS financed the research, grant number 0340-2013 and Universidad Nacional de Colombia - UDEC (Joint Research Projects CALL - 2017)

Language: Spanish

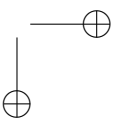
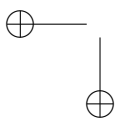
Open access



Cite this paper as: F. Rueda-Velasco, W. Adarme-Jaimes, J. González-Feliu. El sistema de distribución y la eficacia en programas de asistencia nutricional infantil. Caso Bienestarina - Colombia. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 2, pp. 173-196 (2021).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

<https://doi.org/10.14483/23448393.15582>



Resumen

Contexto: Los programas de asistencia alimentaria (PAA) producen y distribuyen alimentos o complementos nutricionales para la reducción de la desnutrición en población vulnerable. En ellos, el sistema de distribución del PAA permite conectar la oferta de asistencia con la población objetivo. Esta investigación busca explorar las relaciones y la articulación entre los elementos del sistema de distribución y la eficacia de un PAA altamente ligado a la población infantil, denominado “Bienestarina Más®” en Colombia.

Método: La relación entre la eficacia del programa y el sistema de distribución se realiza triangulando datos reales de las entregas del PAA y estadísticas poblacionales oficiales. A su vez, las capacidades de los sistemas de información usados para la distribución son contrastadas con el alcance del sistema, usando fuentes oficiales y manuales de usuario.

Resultados: El análisis muestra potencial de mejora en la cobertura de la región suroccidental del país, brechas entre la oferta y la demanda, en especial ante el análisis desagregado de datos, flujos de carga poco coherentes y diferencias entre el alcance del PAA y el alcance de los sistemas de acceso al programa y trazabilidad de la carga.

Conclusiones: Este artículo muestra cómo fallas en la articulación entre los procedimientos de acceso, los perfiles sociales de la población, las asignaciones de los flujos de carga y las tecnologías de la información para el reconocimiento del usuario y el seguimiento de la carga pueden afectar la eficacia en la atención a la población infantil.

Palabras clave: programas de asistencia alimentaria, sistema de distribución, coordinación

Agradecimientos: Los autores agradecen a Colciencias por la financiación del proyecto de investigación registrado bajo contrato 0340-2013 y a la Universidad Nacional de Colombia por las fuentes de fondos otorgadas bajo convocatoria conjunta Unal-UdeC, 2017.

Idioma: Español

1. Introducción

El estudio del problema de desnutrición infantil ha sido crucial por décadas. La evidencia indica un incremento de la inseguridad alimentaria a nivel global y un aumento de la vulnerabilidad de los países a sufrir crisis alimentarias [1]. Se estima que en el mundo hay más de 162 millones de niños por debajo de los 5 años que presentan bajo peso para su edad por causas de desnutrición [2]. Los efectos de la desnutrición son especialmente preocupantes en los casos de madres en estado de gestación, lactantes y niños a quienes puede causar muerte prematura y el deterioro irreversible del desarrollo físico y cerebral [3]. En América Latina y el Caribe el hambre afectó a 47,7 millones de personas en 2019, aumentando por quinto año consecutivo y poniendo en riesgo el cumplimiento del objetivo de hambre cero consignado en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas [4]. En la región podría haber más de 7 millones de niños y niñas con desnutrición crónica [5], causando prevalencia del retraso en el crecimiento de la población infantil, especialmente en los hogares más pobres, donde es aproximadamente tres veces mayor que en la población que vive en los hogares más ricos [6].

Diversos mecanismos se han diseñado para contribuir al incremento del consumo de alimentos en poblaciones vulnerable, especialmente en niños, algunos de ellos promovidos por la FAO (Food and Agriculture Organization) para la lucha contra la malnutrición [7], [8]. Entre estos mecanismos

se encuentran los mecanismos de transferencia directa de efectivo y los mecanismos de incentivo indirecto [9]. La transferencia directa implica la entrega de dinero, de tal manera que se facilite la adquisición de alimentos, se incremente la variedad de alimentos consumidos y por consiguiente se mejore la seguridad alimentaria [2]. Los métodos indirectos se orientan hacia facilitar la adquisición de alimentos, por ejemplo, por medio de incentivos o subsidios a la producción agrícola, que a su vez hacen los productos más asequibles. Estos métodos pueden ser complementados con estrategias basadas en el abastecimiento continuo de complementos alimentarios [10].

Este enfoque ha sido aplicado tanto en países desarrollados como en países en desarrollo. Por ejemplo en países como Estados Unidos, el proyecto federal The Emergency Food Assistance Program (TEFAP) busca entregar alimentos básicos de la canasta familiar estadounidense a familias de bajos recursos [11]. En Australia los Long Day Care Centers (LDCC) pueden proporcionar más de la mitad de la ingesta diaria de alimentos de los niños en centros escolares [12]. En México se distribuye y vende la leche fortificada Liconsa a bajo costo, con el fin de beneficiar a los sectores de escasos recursos [13]. En el caso de Chile, está el Programa Nacional de Alimentación Complementaria (PNAC), que cuenta con un conjunto de actividades de apoyo nutricional cuya población objetivo comprende principalmente niños menores de 6 años y madres lactantes [14]. Un rol similar juega el programa Vaso de Leche en Perú, que permite a niños y adolescentes en situación de vulnerabilidad disfrutar de una a dos comidas diarias distribuidas principalmente en los establecimientos escolares [15]. En Colombia se encuentran programas como Familias en Acción (FA), el Programa de Alimentación Escolar (PAE) y el programa nacional de Bienestarina. El programa de FA apoya a las familias mediante incentivos económicos para la salud y la educación [10]. El PAE brinda un complemento alimentario a los estudiantes de instituciones de educación públicas con el objetivo de contribuir con la permanencia en el sistema escolar [16]. El programa de Bienestarina, centro del análisis de este texto, es un programa estatal, gestionado por el Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF), que se ocupa de la producción y distribución de complementos de alto valor nutricional, siendo la *Bienestarina Más*® su principal producto entregado.

La *Bienestarina Más*® consiste en una mezcla de féculas de cereales, harina de soya y leche entera en polvo, fortificada con vitaminas y minerales, sin conservantes ni colorantes [17] y se contempla como un refuerzo para atacar los problemas de desnutrición, especialmente en los niños y jóvenes en condiciones de pobreza [18]. El estado colombiano financia la totalidad del programa, disponiendo una asignación presupuestal anual de alrededor de 40 millones de dólares para cubrir un cupo programado de seis millones de usuarios anuales [18]. Este presupuesto anual está diseñado para cubrir los costos involucrados en la producción y distribución, por lo que cualquier sobrecosto en este último rubro puede limitar la cantidad a producir, y por lo tanto afectar el grado de atención efectiva a la población vulnerable.

Por lo anterior, en el seguimiento del cumplimiento de las necesidades alimenticias de la población vulnerable, no es suficiente considerar el diseño adecuado de las propiedades nutricionales del complemento alimentario [3], sino también el conjunto de elementos y conexiones que hace posible la entrega efectiva del producto a la población, así como el seguimiento a la cobertura del sistema, el nivel de servicio, los costos de transporte y los tiempos de entrega. El diseño de la red de distribución permite vincular la manufactura con regiones geográficamente dispersas [19], mientras constituye el factor más importante para incrementar la capacidad de respuesta [20], mejorar los

niveles de atención requeridos [21] y disminuir los costos totales [22], principalmente los costos de transporte e inventarios. De este modo, resulta pertinente analizar la estructura del sistema de distribución en programas de transferencias directas de alimentos y de esta manera hacer explícitas las relaciones que sus elementos tienen con la atención de la demanda en la población infantil vulnerable. Si bien se han realizado esfuerzos para medir el impacto de programas de asistencia nutricional e identificar el impacto que estos puedan tener sobre la seguridad alimentaria y la salud de la población beneficiaria, en dichos estudios no se han abordado explícitamente elementos del sistema de distribución y su relación con el cumplimiento de los objetivos de los diferentes programas. Por ejemplo, trabajos como los realizados por [23] han revisado diferentes métodos de medición de los efectos de diferentes tipos de programas para los Estados Unidos, los métodos revisados se enfocan en la salud del beneficiario y sus actividades diarias, pero no contemplan aspectos técnicos de la entrega de las ayudas. Otros estudios se han centrado en la revisión de diferentes escalas y métodos de medición de seguridad alimentaria en el mundo, los resultados muestran que los métodos se centran en las condiciones sociales, de ingesta de alimentos y de indicadores antropométricos en las poblaciones [24], pero no se contemplan los factores de los sistemas de distribución como los relacionados con el éxito de las políticas de seguridad alimentaria. En el contexto del aseguramiento de una adecuada nutrición en poblaciones urbanas, otros autores han contemplado factores referentes a la estructura del sistema de distribución y transporte. Por ejemplo, en [25] consideraron la capacidad de las vías o conexiones de transporte y el aseguramiento de la inocuidad de los alimentos mediante cadenas de frío en el transporte y la distribución, con el objetivo de mejorar la conectividad entre zonas urbanas y rurales. Por su parte, en [26] estudiaron el rol de los detallistas, quienes operan entre la interface de productores y consumidores. Adicionalmente, cumplen un rol crítico a la hora de aumentar la resiliencia de la producción y la oferta. Otros trabajos como los presentados en [27] hacen un llamado para un abordaje integrador entre disciplinas económico-administrativas de la naturaleza y de la tecnología para abordar el problema de seguridad alimentaria desde la perspectiva de la cadena de valor. Siguiendo este enfoque el presente trabajo busca explorar las relaciones y la articulación entre los elementos del sistema de distribución y la eficacia del programa de *Bienestarina Más*® en Colombia, entendiendo eficacia como la capacidad de un programa humanitario para atender su demanda, reduciendo los faltantes y las entregas redundantes hacia la población beneficiaria [28], [29]. Para ello, en primer lugar se hace una síntesis de la metodología propuesta. Luego se presenta en detalle el caso de estudio, en donde se realiza una evaluación de: la cobertura geográfica de la infraestructura del programa, la coherencia entre la oferta y la demanda, la localización de instalaciones de almacenamiento y el plan de transporte. Finalmente, se realiza un diagnóstico con respecto al seguimiento de los usuarios y la trazabilidad de la carga.

2. Metodología

2.1. Estructura general de la metodología

La investigación que aquí se presenta analiza la articulación entre los componentes del sistema de distribución y la eficacia del programa *Bienestarina Más*® en Colombia. Para ello, la investigación acude a dos fuentes principales de datos: primarias y secundarias. Las fuentes primarias se caracterizan por ofrecer datos públicos y oficiales alrededor del programa y las fuentes secundarias por permitir caracterizar la población y sus condiciones de vulnerabilidad alimentaria. Inicialmente,

por medio de los datos oficiales declarados por el ICBF, se caracterizan los componentes del sistema de distribución y se cuantifica la oferta, calculando las cantidades entregadas a los beneficiarios a lo largo del país y los flujos de carga entre las instalaciones. Paralelamente, por medio de fuentes de datos secundarios (externas al ICBF), se calcula la demanda del complemento nutricional en función de la condición de vulnerabilidad de la población objetivo para posteriormente realizar comparaciones entre el alcance del programa de *Bienestarina Más*® y su demanda atendida. La comparación entre fuentes se realiza a través de un proceso de triangulación de datos, que posteriormente derivan en una propuesta para la articulación de los elementos del programa. El detalle de la metodología ejecutada puede verse en la Figura 1.

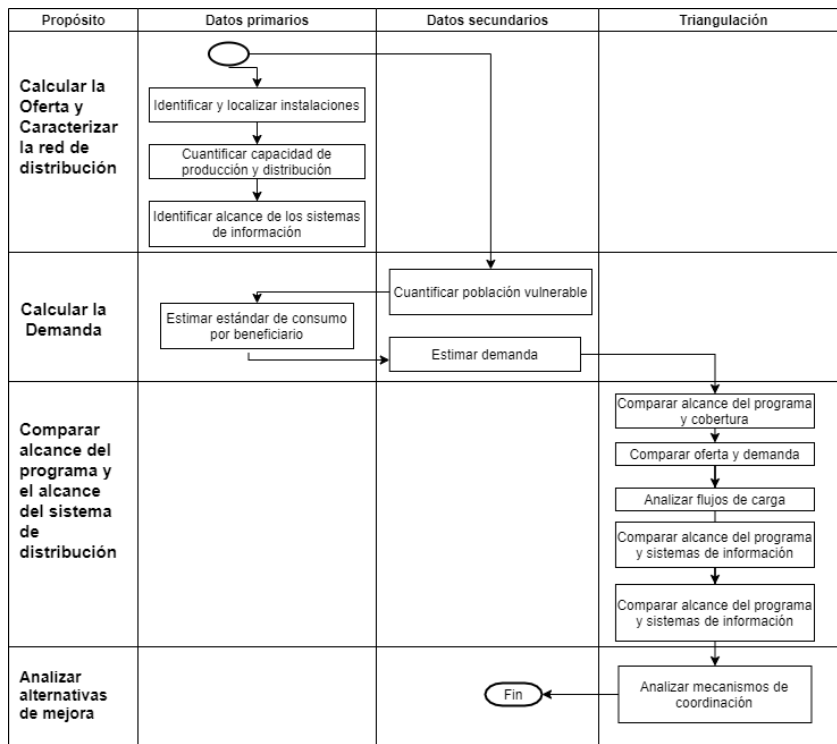


Figura 1. Metodología ejecutada

Fuente: elaboración propia

2.2. Recopilación de datos primarios y cálculo de la oferta

A través de los registros públicos de las entregas de *Bienestarina Más*® [30] se escogió 2015 como el año con mayor volumen de producción y entrega del periodo 2013-2018. El periodo escogido coincide con el aumento de la mortalidad infantil en población vulnerable perteneciente a grupos étnicos en uno de los departamentos de influencia del programa (La Guajira) [31] y se encuentra

dentro de la ventana de operación del Plan Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional lanzado en 2013 [32], [33]. Se recopilaron los datos de distribución que contienen información de la ubicación y la capacidad de las bodegas, así como los datos asociados de cada entrega realizada durante el periodo. Cada registro de entrega comprende la información de la sede regional, municipio y punto de entrega en el destino, planta de manufactura donde se origina el producto, bodega regional que distribuye, cantidad distribuida, tipo de programa por el cual se entrega el producto y cupos atendidos, entre otra información. Posteriormente esta información fue agregada, totalizando las cantidades enviadas en el año en plantas de manufactura, bodega, departamento y municipio. Estos datos corresponden a la oferta anual para el año 2015 de *Bienestarina Más*® a los cuales hacen referencia los posteriores análisis. Esta información fue procesada y visualizada en un entorno de sistemas de información geográfica, usando servicios como Google Maps®, Google Earth® y Arc-Gis 10.3®. La información detallada de la oferta permite describir la estructura y la actividad del sistema de distribución durante el periodo analizado; es decir, detallar los flujos de carga que conectan las plantas de producción con la población vulnerable.

2.3. Recopilación de datos secundarios y cálculo de la demanda

Con el fin de analizar la coherencia entre la estructura del sistema de distribución y las estadísticas nacionales de nutrición infantil en Colombia, se realizó una estimación de la población infantil en condiciones o en riesgo de vulnerabilidad nutricional. Para ello, se tomaron los porcentajes poblacionales por municipio y departamento con necesidades básicas insatisfechas [34] y posteriormente esas proporciones fueron usadas para el cálculo de la población infantil vulnerable acorde con los datos poblacionales proyectados a 2015 y publicados por el Departamento Nacional de Estadística según censo del año 2005 (vigente durante el periodo analizado) [35]. Para este análisis se considera que la población infantil con necesidades básicas insatisfechas presenta un mayor riesgo de malnutrición, siguiendo las relaciones y evidencias previamente identificadas en [36], [37]. Posteriormente, el peso total demandado de *Bienestarina Más*® fue calculado usando la cantidad per cápita entregada más común según instructivos del ICBF (0,9 Kg/beneficiario* mes).

2.4. Análisis y triangulación de datos

Una vez calculada la oferta real de *Bienestarina Más*® y su demanda estimada, se procedió a analizar esos datos frente a los diferentes elementos de su sistema de distribución y la coherencia frente al alcance de cada uno de ellos. Se analizan elementos como la cobertura geográfica, la comparación entre oferta y demanda, los flujos de carga y transporte, y finalmente los sistemas de seguimiento y trazabilidad. La triangulación consiste en contrastar los datos obtenidos con otras fuentes de datos secundarios. El objetivo es obtener nuevas conclusiones sobre el comportamiento del sistema. Por ejemplo, para el análisis de la cobertura geográfica, los datos de oferta y demanda fueron contrastados con listados de municipios reportados por el DANE y triangulados con las estadísticas poblacionales en grupos étnicos, como pueblos indígenas. Así mismo, el análisis de los sistemas de trazabilidad y seguimiento contrastó la estructura y el alcance del sistema de distribución con las capacidades de los sistemas de información reportadas en fuentes oficiales del ICBF. Posteriormente se realizó el análisis de los flujos de carga, proyectando los datos primarios de la oferta de producto sobre la geocodificación del 100 % de los puntos de entrega de *Bienestarina Más*® en Colombia, y la coherencia de los flujos de transporte fue analizada por medio de

la visualización en herramientas como Google Maps® y Arc-Gis 10.8®. Finalmente, se proponen alternativas para la coordinación entre el alcance del programa de asistencia alimentaria y los alcances de los componentes de su sistema de distribución.

3. El sistema de distribución de Bienestarina Más®

La estructura del sistema de distribución de Bienestarina cuenta con la participación de actores públicos y privados. Entre estos actores, interviene el Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF), como ente público encargado de liderar el programa, empresas privadas funcionando como proveedores de suministros y un operador privado encargado de las plantas de producción y de distribuir el producto [18]. Las entregas totales de *Bienestarina Más®* para los años 2015, 2016, 2017 y 2018 fueron de 18.117, 15.993, 15.551 y 17.106 toneladas respectivamente. El número de beneficiarios atendido aproximado fue de 4,5 millones en 2015, 2,7 millones en 2016, 2,5 millones en 2017 y 2,22 en 2018 [38]–[40]. De dichos beneficiarios, para el año 2015 alrededor de un 60 % menores de 5 años y un 20 % menores de edad entre 6 y 18 años, siendo la *Bienestarina Más®* distribuida principalmente a los programas de Hogares Comunitarios de Bienestar, Desarrollo Infantil, Centros de Desarrollo Infantil y el Programa de Alimentación Escolar.

Con el fin de abastecer la demanda, el sistema de distribución se ha configurado con dos plantas de producción que envían la carga del complemento alimentario hacia 21 bodegas (Figura 2), desde las cuales se distribuye el producto a cerca de 5.000 puntos de entrega a nivel nacional (Figura 1). Los puntos de entrega a su vez se conectan con aproximadamente 112.000 unidades ejecutoras, las cuales a su vez suministran el producto para el consumo de los beneficiarios. También puede existir una conexión directa entre puntos de entrega y beneficiarios.

Como puede verse, la estructura del sistema de distribución abarca gran parte del territorio nacional, resultado del sostenimiento y la financiación del programa desde 1976. No obstante, la evidente evolución del programa y su alcance nacional, este tiene potencial para mejorar la coordinación entre los elementos de su sistema de distribución y, por lo tanto, el impacto sobre la población vulnerable. En los siguientes apartes se analizan diferentes factores que desde la estructura del sistema pueden limitar la mejora de este.

3.1. Cobertura geográfica de la infraestructura del programa

La cobertura geográfica de un conjunto de instalaciones es un problema común en el diseño de redes de distribución e investigación de operaciones. Los modelos asociados con este problema usualmente buscan escoger las instalaciones que permitan conectar la demanda con las fuentes de producto con un mínimo número de instalaciones [41]. La investigación en problemas de cobertura ha suscitado revisiones de literatura como las encontradas en [42] y específicamente en el campo humanitario en [41]. Sin embargo, en estas investigaciones no es común el uso de datos reales o realizar evaluaciones en problemas de impacto social como es el caso de la nutrición de la población infantil. Por su parte, el sistema de distribución de *Bienestarina Más®* ha sido construido por casi 40 años, sin evidencias de procesos de decisión que conllevarse a una localización de sus instalaciones para atender la demanda a largo plazo. Al contrario, la cobertura geográfica actual



Figura 2. Localización de bodegas y puntos de entrega actuales del programa a nivel nacional

Fuente: elaboración propia a partir de datos primarios suministrados por ICBF, año 2015

del programa puede interpretarse como el resultado de procesos de decisión *ad-hoc*, en los que las instalaciones del sistema pueden variar de acuerdo con las necesidades del momento. En general, el sistema de distribución de Bienestarina muestra fuertes desafíos para poder combatir efectivamente la desnutrición. Por una parte existe una alta concentración de población en las ciudades y al mismo tiempo la población en zonas rurales es menos densa y geográficamente dispersa. En ambos casos existe población infantil en condiciones de desnutrición, pero las zonas rurales presentan adicionalmente restricciones de infraestructura, dificultades para el suministro de alimentos y acceso limitado a otros servicios como la salud.

Los resultados de cobertura implican un sistema con mayor concentración de puntos de entrega en sitios poblados como las ciudades y una menor cobertura en el norte y en el sudeste del país. El mapa en Figura 3(a) muestra la relación entre la densidad poblacional y la concentración de puntos de entrega, en donde claramente las zonas más pobladas cuentan con un mayor número de puntos de entrega. Este hecho es parcialmente coherente, pues denota prioridad a la entrega de asistencia alimentaria en zonas densamente pobladas, aunque esto no significa que las zonas de menor densidad poblacional posean una menor necesidad nutricional. Por ejemplo, la cantidad de puntos de entrega en el departamento de La Guajira, en el extremo norte del país, son menores que en el interior, lo cual no es coherente con los casos de muertes infantiles por desnutrición ampliamente discutidas en medios de comunicación [31], [43], [44]. De hecho, el departamento presenta una

insuficiente infraestructura y la presencia de población indígena dispersa, lo que dificulta la distribución del alimento. Estas mismas características son encontradas en la región suroriental del país, la cual contiene 10 de los 32 departamentos de Colombia (Casanare, Meta, Caquetá, Vichada, Guainía, Arauca, Vaupés, Amazonas, Guaviare y Putumayo). Como puede verse en el Figura 3(b), los mencionados departamentos muestran deficiencias en la cobertura y, a su vez, una relación directa entre la localización de los puntos de entrega y las principales vías de conexión, lo cual consecuentemente muestra falta de cobertura en zonas con infraestructura de transporte deficiente.

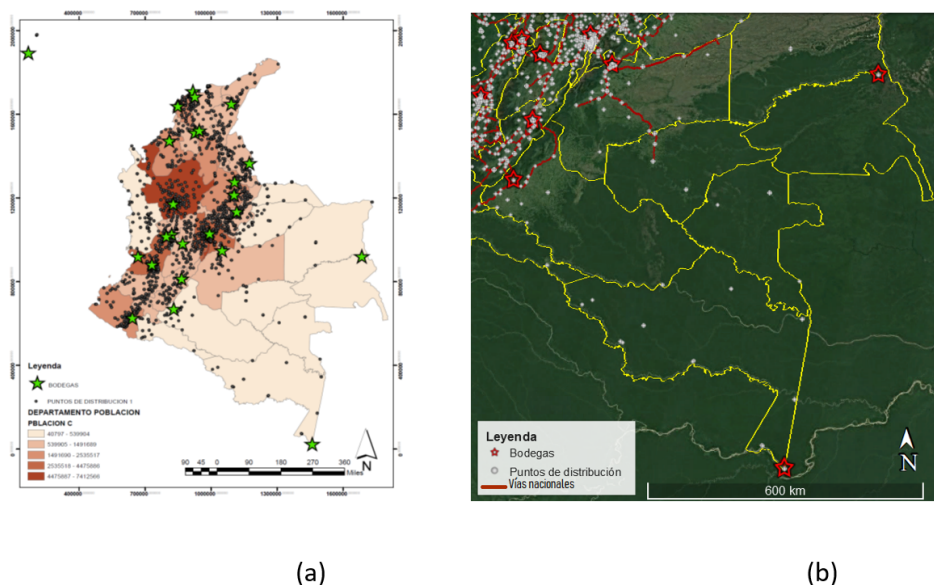


Figura 3. (a) Densidad poblacional vs Puntos de entrega. (b) Localización de bodegas y puntos de entrega en la región sudeste

Fuente: Densidad poblacional [45] y datos primarios ICBF, año 2015

En conclusión, la cobertura en este programa de asistencia nutricional para la población infantil está restringida por el acceso a la infraestructura y la dispersión de la población beneficiaria. Adicionalmente, alcanzar plena cobertura, reducir los tiempos de entrega y reducir los costos, mientras se asegura plena atención de la población vulnerable, no depende enteramente del programa.

La situación lleva a plantear las dificultades que puede llegar a tener un único sistema de distribución para atender efectivamente a la población afectada. Por esta razón, es recomendable diseñar estrategias “a la medida” para aquellas zonas con dificultades de acceso y población dispersa, de tal manera que no dependan de un suministro central y que se adapte a las condiciones de producción local de alimentos, capacidad de las tierras de cultivo, necesidades nutricionales y sobre todo a la cultura de la población vulnerable. Algunas iniciativas pueden incluir el diseño de zonas de autoabastecimiento alimentario o de producción prioritaria de alimentos, las cuales pueden

además fomentar o fortalecer los canales internos de comercialización, generando así cadenas alternativas de suministro de alimentos, como las planteadas en [46]. Las zonas de autoabastecimiento alimentario permitirían no solo adaptar la producción de alimentos a la cultura local, sino también fomentar el desarrollo rural en las poblaciones vulnerables.

3.2. Coherencia entre oferta y demanda

Es recurrente en la literatura en ciencias de la gestión y en la gestión de cadenas de suministro encontrar referencias a la necesidad de incrementar la demanda, por ejemplo, a través de estrategias de mercadeo, y hacer coincidir dicha demanda con la oferta por medio de la gestión de los procesos de producción y abastecimiento. Sin embargo, en contextos humanitarios, incluyendo el de PAA, las condiciones de demanda son frecuentemente impredecibles en términos de temporalidad, localización, tipo o tamaño [47] y por lo tanto, lograr coherencia entre la oferta y la demanda puede ser una tarea retadora. Bajo esa perspectiva, los problemas de gestión de la demanda para la atención de las necesidades nutricionales en poblaciones vulnerables pasan por el entendimiento de la heterogeneidad de la población y la sincronización con los procedimientos de acceso al programa.

El entendimiento de la heterogeneidad de la población implica analizar las diferencias en la población beneficiaria, sobre todo si su alcance es nacional, las cuales pueden estar relacionadas con grupos de edades, la localización rural o urbana, la pertenencia a grupo étnicos, el estado de salud al ingreso del programa y el acceso a servicios, entre otros. En sí misma, la heterogeneidad de la población se convierte en un desafío para alcanzar los requerimientos nutricionales y diseñar los alimentos complementarios, de tal forma que se adapten a las preferencias culturales y además permitan reconocer los diferentes grupos en zonas con problemas de acceso. Este hecho puede generar un incremento en el número de referencias y número de productos o limitaciones para llegar a toda la población. De hecho, el reconocimiento de estas diferencias ha llevado al ICBF a incrementar la oferta de productos incluyendo nuevos sabores en la Bienestarina y diseñando Bienestarina líquida para los lugares con restricciones de acceso al agua potable [17].

Por otra parte, los procedimientos de acceso permiten al sistema incluir nuevos usuarios. En ese sentido, el sistema puede concentrar sus esfuerzos en localizar y suscribir potenciales beneficiarios o generar mecanismos para lograr la autoscripción de los usuarios, que para el caso de la población menor de edad estaría en cabeza por sus padres o tutores legales. El primer caso puede ser costoso para el sistema, pues implica poder reconocer beneficiarios potenciales, lo que requeriría hacer su identificación y localización. El segundo caso requiere que el beneficiario potencial tenga conocimiento de la existencia del programa y adicionalmente las competencias básicas para poder suscribirse, por ejemplo, saber leer y escribir o acceder a internet. Para ambos casos, los procedimientos de acceso deben ser coherentes con el perfil social de la población objetivo y su densidad poblacional. En áreas urbanas con alta concentración de población y niveles de alfabetización adecuados, los procedimientos de autoscripción pueden ser útiles, mientras que en zonas rurales o con condiciones sociales precarias y bajos niveles educativos es el sistema quién debe procurar los esfuerzos por localizar y suscribir a los usuarios.

Para el caso analizado y a la luz de lo expuesto en los párrafos previos, vale la pena resaltar los resultados de las comparaciones entre oferta y demanda. La oferta fue obtenida a partir de los reportes

oficiales y la demanda calculada mediante el procedimiento descrito anteriormente. Los resultados obtenidos para el programa no siempre muestran una coincidencia entre demanda y oferta. Como puede verse en la Figura 4, el análisis de Pareto muestra que la oferta no se encuentra concentrada en un pequeño número de departamentos, no obstante al menos 9 de los 32 departamentos reciben entregas por encima del 100 % de la demanda estimada, mientras que 12 de ellos reciben asistencia por debajo del 60 % de los requerimientos. Como consecuencia, la distribución presenta falencias propias de los esfuerzos de respuesta humanitaria en situaciones de desastre, mostrando sobresuministro y escasez al mismo tiempo, es decir que unas zonas reciben asistencia por encima de los requerimientos, mientras otras zonas se encuentran en faltante [29], [48]. Desde el punto de vista de la eficacia del sistema, la presencia simultánea de sobresuministro y faltante muestra las dificultades del sistema para hacer coincidir la oferta y la demanda.

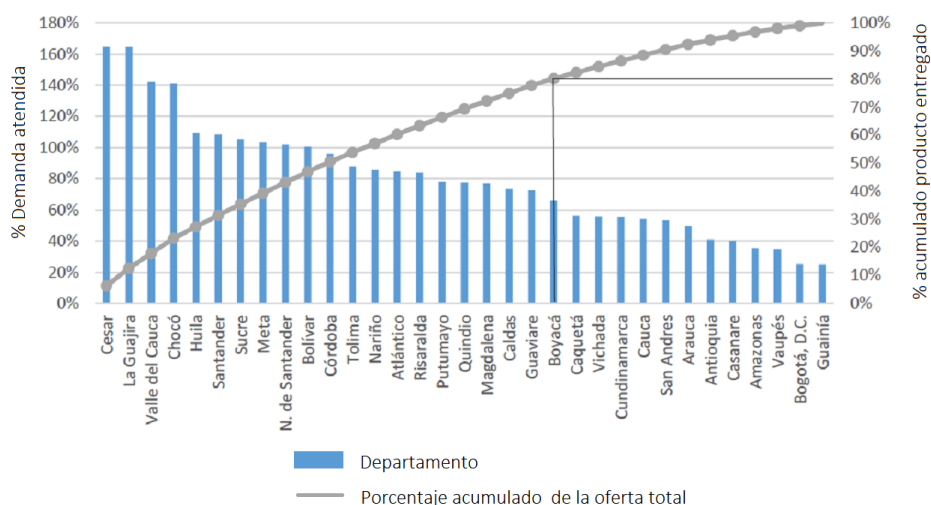


Figura 4. Análisis de Pareto. Distribución de *Bienestar Más* (2015) vs. Requerimientos por departamento (edades entre 0 y 19 años)

Fuente: elaboración propia a partir de ICBF y DANE

Un análisis desagregado por municipio sobre los dos departamentos que reciben proporciones más altas de suministro con respecto a su demanda estimada (Cesar y La Guajira) muestra que la existencia simultánea de sobresuministro y faltante se presenta también a nivel municipal. Algunos de sus municipios muestran escasez significativa, mientras otros tienen porcentaje de atención de hasta el 350 % de su demanda estimada, como puede verse en la Figura 5.

Este comportamiento no es coherente, dado que muestra que a nivel nacional o departamental la demanda total puede satisfacerse, pero no lo es así a nivel desagregado, como puede ser el municipi-

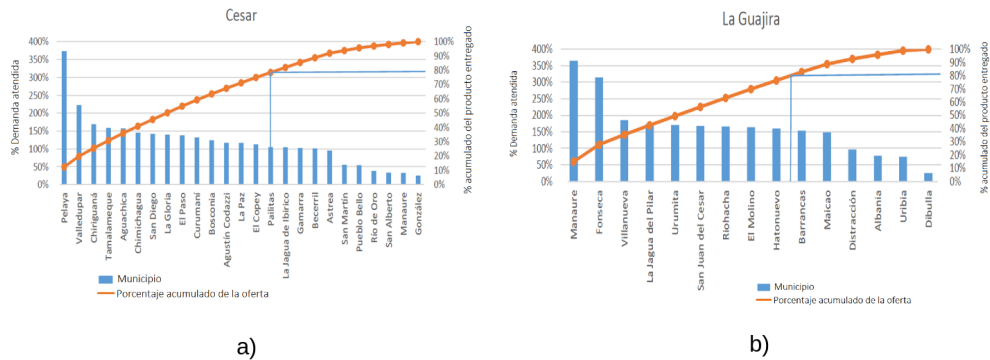


Figura 5. Análisis de Pareto. Distribución de *Bienestarina Más* (2015) vs. Requerimientos por municipio (edades entre 0 y 19 años) (a) Departamento del César (b) Departamento de La Guajira

Fuente: elaboración propia a partir de ICBF y DANE

pal y aún más si la unidad de análisis se reduce a la comunidad. En particular es poco coherente en el caso del departamento de La Guajira, que como se mencionó anteriormente ha sido ampliamente nombrado en medios de comunicación por la crisis nutricional de su población infantil. En general, los resultados pueden ser parcialmente explicados, entre otras, por tres causas técnicas: (i) la deficiente infraestructura de transporte en municipios alejados, (ii) la deficiencia en los procedimientos de acceso, y (iii) las capacidades de los procesos para el reconocimiento de usuario y seguimiento de la carga. La causa (i) es un factor común en las zonas rurales y apartadas de la geografía del país, no obstante, de acuerdo con lo consignado en la política nacional que rige la contratación de los operadores privados del programa de asistencia alimentaria [18], [49], se contempla y presupuesta la atención de estas zonas ampliando los tiempos entre entregas, realizando entregas aéreas o una combinación de ambas. En ese sentido el programa debe garantizar la atención de la demanda de los beneficiarios inscritos independiente de las condiciones de infraestructura, lo que concentra las potenciales causales sobre los procesos de reconocimiento de beneficiarios.

Sobre la causa (ii), actualmente los procesos de reconocimiento implican que, bien sea el usuario de manera autónoma o a través de una empresa administradora del servicio (EAS) o un operador del servicio (OS), reconozca la necesidad nutricional en la población y solicite al Estado a través del ICBF la asignación de cupos en el programa de Bienestarina. El beneficiario a través del EAS-OS debe oficializar su ingreso, sometiéndolo a una verificación de requisitos por medio de la entrega de un conjunto de documentos. Si bien estos procedimientos son públicos y consultables a través de internet, el ICBF actúa de una manera pasiva, asignando cupo por disponibilidad y dejando la gestión de los ingresos en manos de los beneficiarios y las EAS-OS. Adicionalmente, de forma tácita el programa impide el acceso de población sin conocimiento de la existencia de la asistencia nutricional, sin las competencias para acceder a la consulta, o en su forma más básica para poder leer los instructivos y seguirlos. Un análisis más profundo sobre los procesos de acceso y reconocimiento para el programa de Bienestarina puede verse en [50].

Regresando al análisis del Figura 4, se observaron 12 municipios con atención de la demanda por debajo del 60%. De estos departamentos, 10 coinciden con alta presencia de población indígena

y con las zonas de menor concentración de puntos de entrega vistos en la Figura 3. Con el fin de analizar las entregas en esos departamentos, la Tabla I. presenta la cobertura de la población indígena bajo el supuesto optimista de que el total de las entregas son asignadas a este grupo poblacional y luego son comparadas con el porcentaje de cobertura de las entregas por el programa de apoyo a familias de grupos étnicos (PAFET), el cual está diseñado para atender específicamente grupos poblacionales como las comunidades indígenas.

Tabla I. Tasas de cobertura en departamentos con alta concentración de población indígena

Departamento	Cobertura potencial de la población indígena	Cobertura de la población indígena PAFET
Vaupés	13,19 %	0,00 %
Vichada	10,10 %	3,87 %
Guainía	6,87 %	0,00 %
Amazonas	12,94 %	0,00 %
La Guajira	31,14 %	0,16 %
Cauca	30,00 %	0,00 %
Chocó	101,03 %	1,96 %
Guaviare	45,01 %	15,21 %
Putumayo	51,97 %	3,40 %
Nariño	87,76 %	0,00 %

El análisis muestra bajas tasas de cobertura, incluso en el escenario optimista de envío de la totalidad del suministro a la población indígena y lo es aún más en análisis de las entregas reales por el programa de atención a grupos étnicos. Las bajas tasas de cobertura son evidencia de un sistema con dificultades para entregar la asistencia nutricional a la población infantil perteneciente a grupos étnicos, así como deficiencias para que los usuarios puedan suscribirse al programa, bien sea por procedimientos de autosuscripción o con intermediación de entidades privadas o estatales. Estas deficiencias pueden ser causadas por la falta de acceso a la información del programa, o las bajas tasas de alfabetización [51], lo cual puede explicar las capacidades limitadas de los beneficiarios para seguir procedimientos formales. Las mencionadas falencias en los procedimientos de acceso pueden explicar parcialmente las variaciones reportadas entre toneladas distribuidas y número de beneficiarios reportados por las cifras oficiales. Como se mostró previamente, el número de beneficiarios mostró un descenso según los informes oficiales, pasando de 4,5 millones en 2015 a 2,7 millones en 2016, 2,5 millones en 2017 y 2,22 en 2018 [38]–[40]. Estas cifras a nivel agregado no son coherentes con la cobertura de la demanda, la reducción de la desnutrición o la mejora en la calidad de vida del país.

La causa (iii) está asociada a la capacidad de los sistemas de información del programa para reconocer y registrar los beneficiarios actuales y potenciales, así como para hacer seguimiento a la entrega real de la asistencia alimentaria al beneficiario suscrito, lo cual será abordado más adelante en el apartado de seguimiento y trazabilidad.

En conclusión los PAA como Bienestarina deben alinear los procedimientos de acceso y las características de la población objetivo. En condiciones de población heterogénea los esfuerzos de

cobertura del sistema deben procurar flexibilizar el acceso del usuario al sistema, adaptándose por ejemplo a sus condiciones sociales y perfiles de escolaridad. Las fallas en esta sincronización, sumadas a las dificultades para hacer seguimiento de las entregas y de los usuarios, pueden generar una falsa percepción de cobertura del sistema, donde a nivel agregado (nacional o departamental) las estadísticas de cobertura pueden mostrar un panorama completamente diferente que a nivel desagregado (municipal o comunitario). Esto es evidente en el sobresuministro y faltantes simultáneos mostrados a nivel municipal.

4. Flujos de carga y transporte

Los flujos de carga y transporte son producto de las capacidades, el diseño de la red de distribución y las decisiones de asignación que dentro de ella se tomen. El diseño de la red debe realizarse con un horizonte de planeación de largo plazo y su propósito es conectar los materiales producidos con los usuarios finales [19]. En los PAA el diseño de la red de distribución, como en cualquier programa con alcance humanitario, debe permitir conectar la producción con la población vulnerable rápidamente, pero al tener un presupuesto limitado, también debe procurar reducir los costos de transporte y distribución. Este último punto en el programa de *Bienestarina Más®* es muy importante, pues está diseñado para atender bajo un mismo presupuesto los costos de producción y distribución [18]. Esto hace que los incrementos de costo en transporte y distribución impacten negativamente el presupuesto disponible para producir y, por lo tanto, para atender a una mayor cantidad de población.

Desde una perspectiva de ingeniería, diferentes modelos se han diseñado para reducir los costos de distribución en contextos de negocios [52]. Desde el punto de vista humanitario, la reducción de la demanda insatisfecha, la reducción de los tiempos de entrega, la reducción de la distancia recorrida y la reducción del sufrimiento agregado han sido objetivos sociales comunes [28], [54]–[56]. El sistema de distribución analizado combina los objetivos tanto de un sistema de distribución en un contexto de negocios como de un sistema de respuesta a desastres. Del primer contexto rescata la necesidad de reducir los costos de transporte como factor que permitiría el incremento de la cobertura ante disponibilidades limitadas de presupuesto para la producción y entrega de la asistencia alimentaria. En el segundo contexto es necesaria la reducción de la demanda insatisfecha, la garantía de tiempos de entrega reducidos y la reducción del sufrimiento poblacional agregado. De ambos contextos y de sus modelos asociados se puede extractar que, en términos generales, los costos de transporte se reducen en la medida que la cantidad de carga asignada entre dos puntos aumenta y cuando dichos puntos son cercanos, particularmente porque los costos de transporte son especialmente sensibles a las distancias recorridas. La reducción o el aumento de las distancias recorridas por la carga puede también impactar los tiempos de entrega y por lo tanto la eficacia del sistema.

Para el caso analizado se graficaron los flujos de carga para el año 2015. Los flujos se originan en las plantas de producción y se enrutan hacia las bodegas regionales. En la Figura 6 se pueden observar los flujos de carga como líneas, las cuales se hacen más oscuras cuando la cantidad de carga aumenta.

La figura resalta con círculos algunos flujos teóricamente inconsistentes. En dichos flujos se transporta mayor cantidad de carga desde las plantas más lejanas, hecho que no es lógico aún en si-

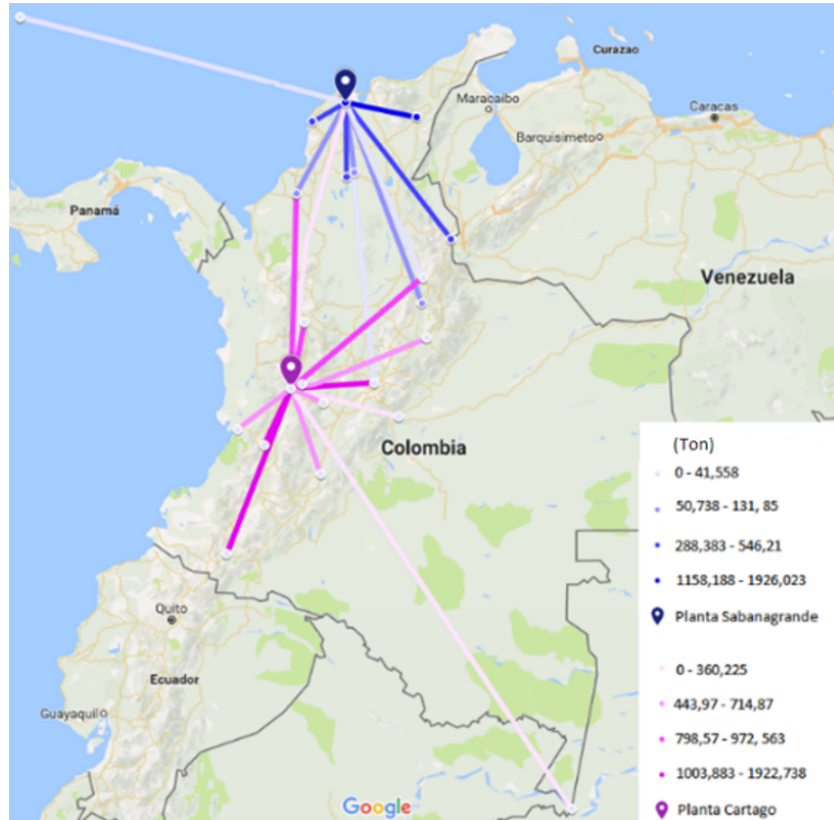


Figura 6. Flujo de Carga, 2015

Fuente: adaptado de [26] mediante Google Maps®

tuaciones de restricción de capacidad de las plantas de producción. De ser este el caso, debería transportarse mayor cantidad de flujo desde la planta cercana y ser completada la asignación con la planta más alejada pero como se puede ver en las secciones resaltadas del gráfico, sucede todo lo contrario. Este hecho muestra posibles ineficiencias en las asignaciones de carga en el sistema, lo que a su vez genera mayores costos de transporte. Un análisis detallado de las asignaciones usando técnicas de programación matemática presentado por Rueda *et al.* [56] mostró que las asignaciones actuales de los flujos de carga entre las instalaciones pueden ser mejoradas modificando la localización de las bodegas y por lo tanto modificando los flujos de asistencia entre las instalaciones del sistema de distribución. El estudio bajo objetivos de reducción de demanda insatisfecha y minimización de la distancia recorrida empleó modelos de programación matemática adaptados al contexto geográfico colombiano y contemplando recorridos no euclidianos entre plantas, bodegas y puntos de distribución.

Es así como se generan oportunidades de mejora a través de la centralización de los planes de transporte y el uso de herramientas como los modelos matemáticos de localización y asignación que permiten producir soluciones óptimas en contextos como el presentado. Por otra parte, desde la política estratégica de la nación se debe evaluar la pertinencia de la asignación en un mismo contrato de la producción y distribución de los alimentos de alto valor nutricional, o si debería incluir condiciones de asignación de carga o el uso de modelos de soporte a las decisiones como requisito para la asignación de dichos contratos.

5. Seguimiento y trazabilidad

Los procesos de seguimiento y trazabilidad se sustentan en las tecnologías de información y telecomunicaciones para permitir identificar a los usuarios del sistema y sus tutores legales, llevar registro detallado de los mismos, garantizar la entrega efectiva del producto y, en una visión más amplia, hacer evaluación a la efectividad del programa por medio del registro y análisis de la situación nutricional de los beneficiarios. De esta forma, a través del uso de herramientas intensivas de analítica de datos [57], un PAA podría retroalimentar sus resultados para mejorar el sistema y el impacto sobre los beneficiarios. La identificación de los usuarios debe permitir en una primera instancia reconocer a los usuarios actuales del sistema por medio de la articulación de los sistemas de información y los procedimientos de acceso. En segunda instancia debe permitir a los gestores de un PAA interactuar con otras entidades como hospitales y centros educativos, para capturar la información de usuarios potenciales y de esta manera mejorar los procesos de vinculación de beneficiarios.

En cuanto a la trazabilidad, esta ha sido definida como la habilidad de hacer seguimiento a la historia, la aplicación o la localización de una entidad por medio de sus datos registrados de identificación [58]. La trazabilidad entonces debe permitir relacionar la identificación de los beneficiarios con el flujo de carga entre fábricas, almacenes, puntos de entrega y beneficiarios, de tal manera que su entrega efectiva pueda ser asegurada. Este último punto es particularmente sensible en el PAA de Bienestarina, en el cual se han denunciado fallas en la destinación del producto, llegando inclusive a ser alimento de engorde para animales de granja [60]–[62]. El seguimiento y la trazabilidad en el PAA de Bienestarina se sustentan en dos sistemas de información denominados Cuéntame y SIM (Sistema de Información Misional). El primero permite registrar los beneficiarios y hacer seguimiento a su estado nutricional [62]. El segundo permite hacer seguimiento al flujo del producto hasta los puntos de entrega, facilitando el control de inventarios y la estimación de los tiempos de llegada, a través de la consolidación de los datos de los sistemas de información internos del operador encargado de la producción y distribución.

Si bien se cuenta con dichas plataformas de información, sus capacidades no tienen la misma cobertura que la entrega de la asistencia alimentaria. Actualmente el proceso de registro de beneficiarios en el sistema Cuéntame tiene alcance hasta las unidades de servicio, no siendo accesible por parte de los beneficiarios. Esto quiere decir que si bien es coherente con el actual procedimiento de acceso, no permite aún procesos de solicitud de cupos o autosuscripción, lo cual para las zonas urbanas podría ser de gran utilidad. Adicionalmente el sistema no tiene aún la capacidad de interconexión con otros programas de asistencia social, bases de datos o plataformas de información

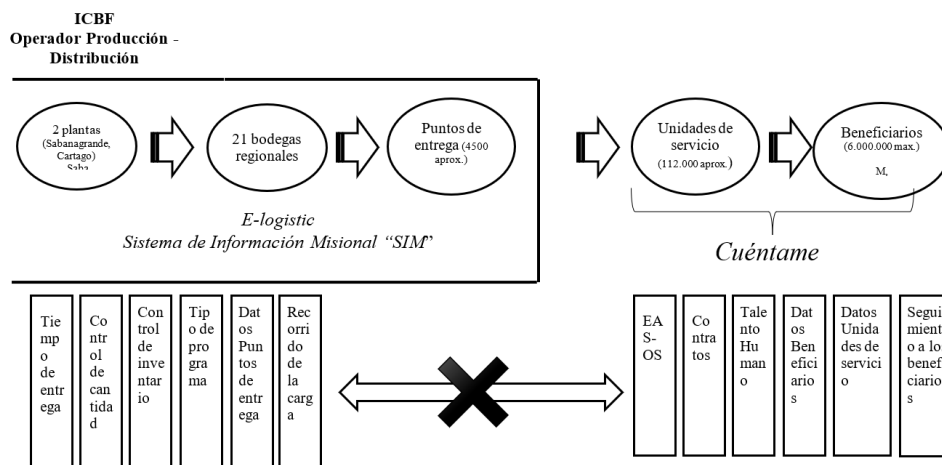


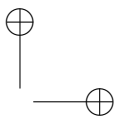
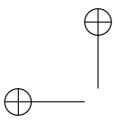
Figura 7. Alcance del sistema de trazabilidad actual de Bienestarina

Fuente: elaboración propia

de instituciones privadas o estatales, de tal manera que dicha interconexión le permitiese identificar nuevos beneficiarios potenciales y de esta manera pasar de un proceso de ingreso pasivo a uno activo. En cuanto al seguimiento del progreso del programa, actualmente Cuéntame permite hacer seguimiento del estado nutricional de los beneficiarios, sin embargo no tiene relación con la trazabilidad de la entrega efectiva del producto a los beneficiarios, lo que limita, en primer lugar, asegurar el uso apropiado de los recursos destinados al programa y, en segundo lugar, relacionar los consumos con la evolución de la población infantil vulnerable. Ampliando el proceso de trazabilidad de la carga, el sistema SIM, al igual que Cuéntame, tiene un alcance diferente al del sistema. Esto quiere decir que el sistema solo permite hacer seguimiento de la carga enviada desde las plantas de producción hasta los puntos de entrega; es decir, el sistema no tiene visibilidad entre los casi 5.000 puntos de entrega con los beneficiarios, que tal como se declaró anteriormente pueden variar entre 2 y 6 millones.

En principio esta ausencia de visibilidad en la entrega final del producto se debe a las responsabilidades contractuales del operador de producción y distribución con las cuales se diseñó el programa, en el que dicho operador es responsable de la distribución hasta los puntos de entrega [18]. Estas falencias de la trazabilidad y los puntos ciegos del sistema en la fase final de la entrega pueden explicar la facilidad para desviar el producto hacia destinos diferentes a los diseñados. La Figura 7 muestra el alcance de los sistemas de apoyo de trazabilidad y seguimiento, así como algunas de las funcionalidades de dichos sistemas.

Por lo anterior se considera fundamental la sincronización de la arquitectura tecnológica actual con el alcance y las necesidades del programa. Es necesario avanzar hacia la trazabilidad de la entrega del producto hasta el nivel del beneficiario, en donde tecnologías de reconocimiento biométrico,



unidas a sistemas de identificación de producto como el código de barras pueden ser implementadas para garantizar entregas efectivas [63].

Adicionalmente se debe avanzar sobre la alineación de la contratación pública del programa con el alcance de este, procurando reducir los puntos ciegos en la visibilidad de usuarios y de la carga.

En el mismo sentido, se hace necesaria la coordinación y la interoperabilidad entre los sistemas de reconocimiento, ingreso y seguimiento del beneficiario con los sistemas de trazabilidad de la carga. Esta conexión habilita la opción de analizar y evaluar la efectividad agregada del programa mediante el uso de técnicas de análisis de datos. Algunas potencialidades pueden incluir el análisis de las mejoras o desmejoras nutricionales de la población infantil por zonas geográficas, su relación con las características del núcleo familiar o entorno social, entre otras. De igual manera, habilitar la interoperabilidad con otros sistemas estatales y otros programas de asistencia social permitirá mejorar la calidad de la asistencia nutricional bajo un enfoque del beneficiario, reduciendo los esfuerzos duplicados y ampliando el efecto de los diferentes programas y sistemas, que hasta el momento actúan de forma independiente. Para ello la conexión con instituciones prestadoras de servicios de salud, programas estatales como Familias en Acción, instituciones educativas, e incluso servicios judiciales y de policía alrededor de la población infantil, podrían ser interconectados.

6. Alternativas de mejora: coherencia entre alcance del programa y sistema de distribución

El análisis del sistema de distribución permite observar que las potenciales mejoras sobre la eficacia del programa de asistencia alimentaria analizado dependen de la coordinación de sus diferentes componentes, de tal manera que el alcance del programa sea coherente con las acciones realizadas para satisfacer la demanda. En ese sentido, dentro de su objetivo de otorgar a la población vulnerable un complemento de alto valor nutricional, su alcance comprende los flujos financieros, de producto y de información de proveedores y fabricantes hasta el beneficiario. Las alternativas se basan en hacer consistentes los elementos del sistema de distribución y el alcance del programa tomando como punto de partida los hallazgos descritos en los apartes anteriores. Las orientaciones para el mejoramiento se clasifican de acuerdo con los mecanismos de coordinación propuestos en [64]: contratos, tecnologías de información, gestión de la información y otras iniciativas para coordinación. Los contratos tienen el propósito de mejorar la gestión de las relaciones entre proveedores y clientes de un producto o servicio, reduciendo el riesgo y permitiendo compartir riesgos o beneficios entre las partes involucradas [65]. Las tecnologías de información ayudan a mejorar el vínculo entre los orígenes del suministro (proveedores, fábricas) y los consumidores, mientras que la gestión de información permite, entre otras, acordar voluntades de información compartida y facilitar la adquisición de datos interoperables con las tecnologías de información [64]. Otras iniciativas de colaboración, como el uso de modelos matemáticos en el diseño u operación del sistema de distribución, crean marcos de entendimiento entre las partes para sustentar los contratos o la toma de decisiones. La Tabla II resume las iniciativas o alternativas propuestas.

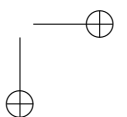
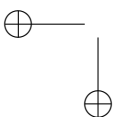


Tabla II. Alternativas de mejora y su relación con mecanismos de coordinación

Elemento	Iniciativa	MC			
		C	TI	GI	OI
Cobertura geográfica	Diseñar programas a la medida para enfrentar condiciones de topografía y carencia de infraestructura: un programa de distribución directa (como el actual) dirigido a zonas urbanas y zonas de autoabastecimiento alimentario o de producción prioritaria de alimentos para zonas rurales o zonas apartadas.				X
Coherencia entre oferta y demanda	Flexibilizar los procesos de suscripción e ingreso al programa de acuerdo con el grado de vulnerabilidad de la población, permitiendo la autosuscripción de la población vulnerable en zonas urbanas con mayores grados de alfabetización y acceso a sistemas de telecomunicaciones (ej. teléfono e internet). Realizar campañas de suscripción de la población rural y grupos étnicos en zonas con acceso limitado a sistemas de telecomunicación y bajos niveles de alfabetización.			X	
	Sincronizar sistemas de información con otros programas o instituciones estatales que den cobertura a la población en condición de vulnerabilidad, tales como hospitales, servicios de administración de justicia, otros programas de asistencia social (PAE, Familias en Acción) y servicios escolares.		X		
Flujos de carga y transporte	Sustentar las decisiones de asignación de flujos de carga y localización de bodegas en modelos de programación matemática.				X
	Incluir en los contratos con los operadores privados que administran el sistema de distribución, las condiciones de número y localización de bodegas como requisito, con el fin de mejorar la cobertura geográfica y reducir el faltante.		X		
Seguimiento y trazabilidad	Alinear los alcances entre sistemas de información. Permitir la visibilidad y seguimiento de la carga para todos los eslabones de la cadena de suministro, entre la producción y el consumo (actualmente solo entre la producción y los puntos de distribución). Integrar sistemas de información de reconocimiento y suscripción de beneficiarios con los sistemas de trazabilidad de la carga.			X	
	Integrar sistemas de información e incluir en sus contratos de diseño e implementación la visibilidad y la trazabilidad del sistema desde el reconocimiento y la suscripción hasta la entrega del producto al beneficiario.		X		

* MC: mecanismo de coordinación, C: contratos, TI: tecnologías de la información, GI: gestión de la información, OI: otras iniciativas.

7. Conclusiones

A través del estudio de los PAA se ha podido evidenciar que su efectividad sobre la situación nutricional en la población infantil excede el diseño de los complementos alimentarios. La interacción entre la estructura del sistema de producción y distribución contribuye significativamente con el desempeño del programa. Así mismo el estudio de los sistemas de distribución en PAA implica el estudio de un sistema de distribución de características únicas que a su vez hacen más complejas las labores de entrega. Algunas de estas características comprenden la coexistencia de zonas de alta y baja concentración poblacional, la cobertura nacional que implica dispersión geográfica, la estructura de financiación estatal y la heterogeneidad de la población.

De acuerdo con el análisis de los sistemas de distribución abordados en el PAA de *Bienestarina Más®* se puede evidenciar que la coordinación y la alineación de elementos y actores involucrados es un gran desafío para la mejora del estado nutricional de la población infantil. De esta manera, se hace necesario que los procedimientos y las modalidades de acceso se sincronicen con las características de una población heterogénea y de estos a su vez con la infraestructura tecnológi-

ca disponible. También se hace necesaria la coordinación entre planes de transporte y diseño del sistema de distribución con la localización de la población y los perfiles sociales, económicos y de formación académica de los habitantes, de tal manera que se mejore la ya ampliada cobertura geográfica del programa. Es así como se debe procurar garantizar el acceso a poblaciones como la indígena en donde sus condiciones sociales les impiden en muchas ocasiones seguir procedimientos de acceso rígidos o inclusive conocer de la existencia de programa.

En el mismo sentido, la coordinación entre los procesos de transporte y de trazabilidad de la carga con el registro y seguimiento de los beneficiarios genera oportunidades para el uso de técnicas de analítica de datos que a su vez permitiría analizar la efectividad del programa de una forma integral. Es así como la información del perfil del beneficiario, su consumo del producto, su ubicación geográfica y la evolución del estado nutricional permitiría identificar comportamientos atípicos en la entrega de los complementos nutricionales, así como regiones con mejor desempeño nutricional y, en general, ofrecer oportunidades de mejora a través de comportamientos no obvios identificados por el relacionamiento de los datos.

Es fundamental analizar detalladamente el comportamiento de los indicadores de cobertura, ya que aunque se evidencia sobreabastecimiento en departamentos como La Guajira, Cesar y Valle del Cauca, se siguen observando elevados índices de desnutrición en los mismos. Lo anterior se explica debido al envío de elevadas cantidades de Bienestarina a uno o unos pocos de sus municipios. De este modo, aunque el volumen despachado de Bienestarina presenta niveles aceptables, el producto no llega estrictamente a toda la población que lo necesita.

Así mismo, se observan falencias en la cobertura del programa en el suroriente del país, en donde aunque se tiene alta densidad de población en condición de desnutrición, se presentan debilidades en infraestructura de transporte que dificultan el acceso del bien a la población vulnerable.

Frente a este panorama, se pueden diseñar estrategias de fortalecimiento para atacar la desnutrición en zonas de acceso restringido, tales como la aplicación de métodos indirectos de acceso a alimentos como fomento a la producción agrícola diversificada en la zona. A través de este método, se pretende la identificación y el cultivo de una combinación adecuada de alimentos, cuyo valor nutricional contribuya a mejorar la seguridad alimentaria en la zona, junto con la disposición de recursos para garantizar la producción. Ofreciendo una solución con alta probabilidad de adopción, respaldada por autores como [66], quienes proponen explorar las prácticas locales e incluir a productores, procesadores y consumidores como actores en un enfoque combinado.

Finalmente, se hace un llamado hacia la centralización, la interconexión de datos y la interoperabilidad de los sistemas de información en los programas estatales de atención a la población infantil. A partir del estudio de la PAA de *Bienestarina Más*® es posible evidenciar que la nutrición es solo una arista del bienestar integral de la población infantil, en el cual los sistemas de salud, de educación, judicial y de orden público juegan un papel fundamental en el desarrollo del menor. De esta forma, la integración de la información del menor desde sus diferentes dimensiones fomentaría una visión integral de su desarrollo y generaría al Estado grandes oportunidades de mejorar sus condiciones sociales y calidad de vida.

Finalmente, este artículo establece las bases para el estudio de la efectividad de los PAA por medio del análisis de sus sistemas de distribución, haciendo explícitas sus relaciones y principales elementos, y de esta forma contribuyendo con el avance de la literatura científica en la temática encontrada hasta el momento.

References

- [1] S. Suweis, J. A. Carr, A. Maritan, A. Rinaldo, and P. D’Odorico, “Resilience and reactivity of global food security”, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 112, no. 22, pp. 6902-6907, 2015. <https://doi.org/10.1073/pnas.1507366112> ↑174
- [2] R. de Groot, T. Palermo, S. Handa, L. P. Ragno, and A. Peterman, “Cash transfers and child nutrition: Pathways and impacts”, *Dev. Policy Rev.*, vol. 35, no. 5, pp. 621-643, 2017. <https://doi.org/10.1111/dpr.12255> ↑174, 175
- [3] J. Fanzo, “Ethical issues for human nutrition in the context of global food security and sustainable development”, *Glob. Food Sec.*, vol. 7, pp. 15-23, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2015.11.001> ↑174, 175
- [4] FAO, “ONU: el hambre en América Latina y el Caribe podría afectar a casi 67 millones de personas en 2030”, *FAO Noticias*, 2020. [Online]. Available: <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/1297774/> ↑174
- [5] A. Palma, “Malnutrición en niños y niñas en América Latina y el Caribe”, *Boletín Desafíos*, no. 21, 2018. [Online]. Available: <https://www.cepal.org/es/enfoques/malnutricion-ninos-ninas-america-latina-caribe> ↑174
- [6] FAO, “The state of food security and nutrition in the world 2020”, FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO, Roma, 2020. ↑174
- [7] J. González-Feliu, C. Osorio-Ramírez, L. Palacios-Argüello, and C. Talamantes, “Local Production-Based Dietary Supplement Distribution in Emerging Countries in social improvement logistics: Bienestarina Distribution in Colombia”, in *Establishing Food Security and Alternatives to International Trade in Emerging Economies*, Hershey, PA: IGI Global, pp. 297-315, 2018. ↑174
- [8] IalcsH, “IalcsH - Iniciativa América Latina y Caribe Sin Hambre 2025”. [Online]. Available: <http://www.ialcsh.org/> ↑174
- [9] S. Tiwari *et al.*, “Impact of cash transfer programs on food security and nutrition in sub-Saharan Africa: A cross-country analysis”, *Glob. Food Sec.*, vol. 11, pp. 72-83, 2016. ↑175
- [10] S. López-Arana, M. Avendaño, F. J. van Lenthe, and A. Burdorf, “The impact of a conditional cash transfer programme on consumption in Colombia”, *Public Health Nutr.*, vol. 19, no. 14, pp. 2629-2642, 2016. ↑175
- [11] L. B. Davis, I. Sengul, J. S. Ivy, L. G. Brock III, and L. Miles, “Scheduling food bank collections and deliveries to ensure food safety and improve access”, *Socioecon. Plann. Sci.*, vol. 48, no. 3, pp. 175-188, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2014.04.001> ↑175
- [12] L. K. Bell, G. A. Hendrie, J. Hartley, and R. K. Golley, “Impact of a nutrition award scheme on the food and nutrient intakes of 2- to 4-year-olds attending long day care”, *Public Health Nutr.*, vol. 18, no. 14, pp. 2634-2642, 2015. <https://doi.org/10.1017/S1368980014003127> ↑175
- [13] C. Talamantes, “Análisis de los procesos de acopio, producción y distribución de leche Licons en México”, Ciudad Juárez, México, 2016. ↑175
- [14] Departamento de Alimentos y Nutrición - Ministerio de Salud de Chile, “Manual de Programas Alimentarios”, Santiago de Chile, 2011. ↑175
- [15] G. Gajate y M. Inurritegui, “El impacto del Vaso de Leche sobre el nivel de nutrición infantil”, *Econ. y Soc.*, vol. 50, no. 5, pp. 63-70, 2003. ↑175
- [16] Ministerio de Educación Nacional de Colombia, “Programa de alimentación escolar”, *Programa de Alimentación Escolar (PAE)*, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.mineducacion.gov.co/1621/article-235135.html> ↑175
- [17] ICBF, “Distribución, cuidado y uso de un alimento de alto valor nutricional. Bienestarina Más precocida” Bogotá: Instituto Colombiano de Bienestar Familiar, 2014. ↑175, 182
- [18] DNP, “Conpes 3843. Importancia estratégica de los alimentos de alto valor nutricional que serán entregados por el ICBF en las vigencias 2016-2019” Bogotá: Departamento Nacional de Planeación, 2015. [En línea]. Disponible en:

- https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/conpes_dnp_3843_2015.htm ↑ 175, 179, 184, 186, 189
- [19] D. J. Bowersox, D. J. Closs, and M. B. Cooper, *Supply Chain Logistics Management*, 4th ed. McGraw-Hill Education, 2012. ↑ 175, 186
- [20] S. Chopra, and P. Meindl, *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*, 5th ed. New Jersey: Pearson, 2013. ↑ 175
- [21] R. Banomyong, and N. Supatn, “Developing a supply chain performance tool for SMEs in Thailand”, *Supply Chain Manag.* vol. 16, no. 1, pp. 20-31, 2011. <https://doi.org/10.1108/13598541111103476> ↑ 176
- [22] D. Simchi-Levi, P. Kaminsky, and E. Simchi-Levi, *Managing the Supply Chain: The Definitive Guide for the Business Professional*. Boston: McGraw-Hill Education, 2004. ↑ 176
- [23] C. D. Meyerhoefer, and M. Yang, “The relationship between food assistance and health: A review of the literature and empirical strategies for identifying program effects”, *Appl. Econ. Perspect. Policy*, vol. 33, no. 3, pp. 304-344, 2011. <https://doi.org/10.1093/aep/ppr023> ↑ 176
- [24] R. Pérez-Escamilla, and A. M. Segall-Corrêa, “Food insecurity measurement and indicators”, *Rev. Nutr.*, vol. 21, no. suppl., pp. 15-26, 2008. ↑ 176
- [25] S. Bloem, and S. de Pee, “Developing approaches to achieve adequate nutrition among urban populations requires an understanding of urban development”, *Glob. Food Sec.*, vol. 12, pp. 80-88, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.09.001> ↑ 176
- [26] S. Macfadyen et al., “The role of food retailers in improving resilience in global food supply”, *Glob. Food Sec.*, vol. 7, pp. 1-8, 2015. ↑ 176, 187
- [27] J. F. Espinosa-Cristia, J. Feregrino, and P. Isla, “Emerging, and old, dilemmas for food security in Latin America”, *J. Public Aff.*, vol. 19, no. 3, pp. 1-14, 2019. <https://doi.org/10.1002/pa.1999> ↑ 176
- [28] F. Regis-Hernández, J. Mora-Vargas, and A. Ruiz, “A multi-criteria vertical coordination framework for a reliable aid distribution”, *J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 10, no. 4, pp. 789-815, 2017. <http://dx.doi.org/10.3926/jiem.2253> ↑ 176, 186
- [29] L.-M. Jensen, and S. Hertz, “The coordination roles of relief organisations in humanitarian logistics”, *Int. J. Logist. Res. Appl.*, vol. 19, no. 5, pp. 465-485, 2016. <https://doi.org/10.1080/13675567.2015.1124845> ↑ 176, 183
- [30] ICBF, “Distribución Bienestarina programas regulares”, *Bienestarina Más y otros alimentos de alto valor nutricional*, Instituto Colombiano de Bienestar Familiar, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.icbf.gov.co/bienestar/nutricion/bienestarina> ↑ 177
- [31] D. Contreras, A. Voets, J. Junghardt, S. Bhamidipati, and S. Contreras, “The drivers of child mortality during the 2012-2016 drought in La Guajira, Colombia”, *Int. J. Disaster Risk Sci.*, vol. 11, pp. 87-104, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13753-020-00255-1> ↑ 177, 180
- [32] Gobierno Nacional, “Plan Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional”, Bogotá, 2013. ↑ 178
- [33] ICBF, “Política de Seguridad Alimentaria y Nutricional”, *Plan Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional*, Bogotá: Instituto Colombiano de Bienestar Familiar, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.icbf.gov.co/bienestar/nutricion/politica-seguridad-alimentaria> ↑ 178
- [34] DANE, “Necesidades básicas insatisfechas (NBI)”, *Necesidades básicas insatisfechas (NBI)*, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/necesidades-basicas-insatisfechas-nbi> ↑ 178
- [35] DANE, “Proyecciones de población”, *Proyecciones de población*, 2005. [En línea]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion> ↑ 178
- [36] M. Montilva, M. A. Ferrer, R. Nieto, Y. Ontiveros, L. Durán y M. A. Mendoza, “Uso del método: necesidades básicas insatisfechas en la detección de comunidades con riesgo de desnutrición”, *An. Venez. Nutr.*, vol. 16, no. 1, pp. 16-22, 2003. ↑ 178
- [37] B. Navazo, S. L. Dahinten y E. E. Oyhenart, “Malnutrición y pobreza estructural: comparación de dos cohortes de escolares de Puerto Madryn, Argentina”, *Rev. Salud Pública*, vol. 20, no. 1, pp. 60-66, 2018. <http://dx.doi.org/10.15446/rsap.v20n1.68576> ↑ 178
- [38] ICBF, “Informe de gestión 2015”, Bogotá: Instituto Colombiano de Bienestar Familiar, 2016. ↑ 179, 185
- [39] ICBF, “Informe de gestión 2016”, Bogotá: Instituto Colombiano de Bienestar Familiar, 2017. ↑ 179, 185
- [40] ICBF, “Informe de gestión 2017”, Bogotá: Instituto Colombiano de Bienestar Familiar, 2018. ↑ 179, 185
- [41] B. Balcik, and B. M. Beamon, “Facility location in humanitarian relief”, *Int. J. Logist. Res. Appl.*, vol. 11, no. 2,

- pp. 101-121, 2008. <https://doi.org/10.1080/13675560701561789> ↑179
- [42] R. Z. Farahani, N. Asgari, N. Heidari, M. Hosseini, and M. Goh, "Covering problems in facility location: A review", *Comput. Ind. Eng.*, vol. 62, no. 1, pp. 368-407, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.08.020> ↑179
- [43] J. Bonet-Morón y L. W. Hahn-De-Castro, "La mortalidad y desnutrición infantil en la Guajira", Documentos de Trabajo sobre Economía Regional, no. 255, Cartagena: Banco de la República, 2017. ↑180
- [44] El Heraldo, "Cinco causas de la crisis humanitaria en La Guajira", *El Heraldo*, 28 de febrero, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.elheraldo.co/la-guajira/cinco-causas-de-la-crisis-humanitaria-en-la-guajira-245843> ↑180
- [45] DANE, "Servicio Web Geográfico (WMTS) que representa Densidad de población en resto, según municipio 2005", *Catálogo de Metadatos Geográficos*, Departamento Administrativo Nacional de Estadística. [En línea]. Disponible en: <https://geoportal.dane.gov.co/geonetwork/srv/spa/catalog.search;jsessionid=E8139CC9E5EFC9916B582D83B95C2E94#/metadata/ec2983a5-5956-4dd2-b3c5-df9309f665c3> ↑181
- [46] J. Dixon, and C. Richards, "On food security and alternative food networks : Understanding and performing food security in the context of urban bias", *Agric. Human Values*, vol. 33, pp. 191- 202, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10460-015-9630-y> ↑182
- [47] G. Kovács, and K. Spens, "Identifying challenges in humanitarian logistics", *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.*, vol. 39, no. 6, pp. 506-528, 2009. <https://doi.org/10.1108/09600030910985848> ↑182
- [48] B. Balcik, B. M. Beamon, C. C. Krejci, K. M. Muramatsu, and M. Ramirez, "Coordination in humanitarian relief chains: Practices, challenges and opportunities", *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 126, no. 1, pp. 22-34, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.09.008> ↑183
- [49] DNP, "Conpes 3443. Contratación del operador para la producción y distribución del componente nutricional (Bienestarina) en el Instituto Colombiano de Bienestar Familiar - ICBF" Bogotá: Departamento Nacional de Planeación, 2006. ↑184
- [50] R. Saboyá, *Caracterización de los procesos para el acceso y seguimiento de los usuarios de Bienestarina*, (Trabajo de Grado), Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2018. ↑184
- [51] DANE; Universidad del Valle, "Análisis Regional de los principales indicadores sociodemográficos de la comunidad afrocolombiana e indígena a partir de la información del Censo General 2005", Bogotá: Departamento Administrativo Nacional de Estadística; Universidad del Valle, 2010. ↑185
- [52] J. Mula, D. Peidro, M. Díaz-Madroño, and E. Vicens, "Mathematical programming models for supply chain production and transport planning", *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 204, no. 3, pp. 377-390, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.09.008> ↑186
- [53] A. M. Caunhye, X. Nie, and S. Pokharel, "Optimization models in emergency logistics: A literature review", *Socioecon. Plann. Sci.*, vol. 46, no. 1, pp. 4-13, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2011.04.004> ↑
- [54] G. Galindo, and R. Batta, "Review of recent developments in OR/MS research in disaster operations management", *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 230, no. 2, pp. 201-211, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.039> ↑186
- [55] J. Holguín-Veras, N. Pérez, M. Jaller, L. N. Van Wassenhove, and F. Aros-Vera, "On the appropriate objective function for post-disaster humanitarian logistics models", *J. Oper. Manag.*, vol. 31, no. 5, pp. 262-280, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2013.06.002> ↑186
- [56] F. Rueda-Velasco, W. Adarme-Jaimes, A. Garzón-Luna, J. Marroquín-Ávila, and G. Parada- Caro "Evaluation of a facility location for a food assistance supply chain: The case of Bienestarina in Colombia", *Ing. e Investig.*, vol. 39, no. 3, 2019. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v39n3.77175> ↑186, 187
- [57] S. Fan, R. Lau, and J. L. Zhao, "Demystifying big data analytics for business intelligence through the lens of marketing mix", *Big Data Res.*, vol. 2, no. 1, pp. 28-32, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.bdr.2015.02.006> ↑188
- [58] ISO, *ISO 8402: 1994: Quality Management and Quality Assurance - Vocabulary*. International Organization for Standardization, 1994. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/20115.html> ↑188
- [59] El Tiempo, "Utilizan Bienestarina para engordar cerdos", *El Tiempo*, 04 de abril, 2007. [En línea]. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-2437390> ↑
- [60] N. Quevedo, "Los traficantes de Bienestarina", *El Espectador*, 12 de octubre, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://www.elespectador.com/judicial/>

- [los-trafficantes-de-bienestarina-article-166306/](#) ↑188
- [61] Canal 1, “Bienestarina para engordar marranos”, *Noticias Uno*, Canal 1, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://noticias.canal1.com.co/que-tal-esto/bienestarina-para-engordar-marranos/> ↑188
- [62] ICBF, “Cuéntame - Sistema de Información de Primera Infancia”, *Primera Infancia*, Bogotá: Instituto Colombiano de Bienestar Familiar. [En línea]. Disponible en: <https://www.icbf.gov.co/programas-y-estrategias/primera-infancia/cuentame> ↑188
- [63] F. J. Rueda-Velasco, A. Monsalve-Salamanca, and W. Adarme-Jaimes, “Methodology for the design of traceability system in food assistance supply chains”, in *Handbook of Research on Urban and Humanitarian Logistics*, IGI Global, pp. 179-200, 2019. ↑190
- [64] K. Arshinder, A. Kanda, and S. G. Deshmukh, “A review on supply chain coordination: Coordination mechanisms, managing uncertainty and research directions”, in *Supply Chain Coordination under Uncertainty*, Springer, pp. 39-82, 2011. ↑190
- [65] H. Krishnan, and R. A. Winter, “On the role of revenue-sharing contracts in supply chains”, *Oper. Res. Lett.*, vol. 39, no. 1, pp. 28-31, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.orl.2010.10.007> ↑190
- [66] M. A. Slingerland, K. Traore, A. P. P. Kayodé, and C. E. S. Mitchikpe, “Fighting Fe deficiency malnutrition in West Africa: An interdisciplinary programme on a food chain approach”, *NJAS - Wageningen J. Life Sci.*, vol. 53, no. 3-4, pp. 253-279, 2006. [https://doi.org/10.1016/S1573-5214\(06\)80009-6](https://doi.org/10.1016/S1573-5214(06)80009-6) ↑192

Feizar Javier Rueda Velasco

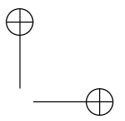
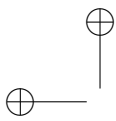
Doctorado en Ingeniería-Industria y Organizaciones, Universidad Nacional de Colombia; Magister en Ingeniería Industrial. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Profesor Asistente, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Pertenece como investigador a los grupos de investigación ARCOSES de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y al Grupo de Investigación SEPRO de la Universidad Nacional de Colombia.
Correo electrónico: fjruefav@udistrital.edu.co

Wilson Adarme Jaimes

Doctor en Ingeniería- Industria y Organizaciones, de la Universidad Nacional de Colombia. Magister en Ingeniería, Universidad del Valle. Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Colombia. Investigador del grupo de Investigación SEPRO de la Universidad Nacional de Colombia.
Correo electrónico: wadarme@unal.edu.co

Jesus Gonzalez-Feliu

PhD. in Computer and Systems Engineering, Politecnico de Turin (Italia). Full Professor, Centre de Recherche en Intelligence et Innovation Managériales, Excelia Group (La Rochelle, France)
Correo electrónico: gonzalezfeliuj@excelia-group.com



Research

Evaluation of Nitrogen Mineralization in an Acid Soil with Inorganic and Organic Fertilization

Evaluación de la mineralización del nitrógeno en un suelo ácido bajo fertilización inorgánica y orgánica

Luz Karime Torres-Lozada¹, **Duvan Escobar-Medina**², **Jonathan Soto-Paz**², **Martha Constanza Daza-Torres**³, **Patricia Torres-Lozada**²

¹Fundación Universitaria Unisangil, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Grupo de Investigación Terranare, Yopal, Colombia., ²Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental ECCA, Cali, Colombia, ³Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación Gestión Integral del Riego para el Desarrollo Agrícola y la Seguridad Alimentaria REGAR, Cali, Colombia. Correspondence email: luz.torres.lozada@correounivalle.edu.co, ltorres2@unisangil.edu.co

Recibido: 03/09/2020. Modificado: 11/05/2021. Aceptado: 20/05/2021.

Abstract

Context: The population increase and the demand for food generate greater demands on productivity, which stimulates the use of inorganic fertilizers as a common practice in agricultural systems, thus generating potential risks of contamination by nutrient leaching, in addition to high costs that can affect the profitability of production systems. The application of organic materials from the composting of organic substrates is a common source of fertilization in clean, organic production systems with lower costs.

Method: This study evaluated the effect of fertilization with an Organic Amendment (EO) from the composting of Municipal Biowaste-BW mixed with cachaça on the mineralization of nitrogen ($N_{\text{mineralized}}$) in an acidic soil through six treatments: three controls (T1: 100 % soil; T2: 100 % EO; T3: 100 % urea-inorganic fertilization: F) and three EO(%):F(%) proportions (T4: 50-50, T5: 75-25, T6: 25-75) during an incubation period of 16 weeks.

Results: Four mineralization models were applied (Stanford & Smith, Broadbent, linear, and polynomialExponential), and it was found that T4 allowed to achieve a contribution of $N_{\text{mineralized}}$ (12.546,39 mg/kg) similar to inorganic fertilization (T3: 13.931,05 mg/kg); the Broadbent ($R^2 > 0,98$) and linear ($R^2 > 0,90$) models achieved the best fit.

Conclusions: This partial inorganic fertilizer replacement strategy can achieve up to 50 % inorganic fertilizer replacement.

Keywords: Biowaste-BW, Cachaça, Composting, Nitrogen Mineralization, Urea

Acknowledgements: The authors wish to express their appreciation for the support of project C. I. 2985 of Universidad del Valle.

Language: Spanish

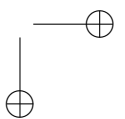
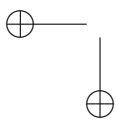
Open access



Cite this paper as: Torres-Lozada, L. K., Escobar-Medina, D., Soto-Paz, J., Daza-Torres, M. C., Torres-Lozada, P.: Evaluación de la mineralización del nitrógeno en un suelo ácido bajo fertilización inorgánica y orgánica. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 2, pp. 197-212 (2021).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

<https://doi.org/10.14483/23448393.16954>



Resumen

Contexto: El incremento poblacional y la demanda de alimentos generan mayores demandas en la productividad, lo que estimula el uso de fertilizantes inorgánicos como una práctica habitual en los sistemas agrícolas, generando potenciales riesgos de contaminación por lixiviación de nutrientes, además de altos costos que pueden afectar la rentabilidad de los sistemas productivos. La aplicación de materiales orgánicos procedentes del compostaje de sustratos orgánicos es una fuente de fertilización común en sistemas de producción limpia, orgánica y con menores costos.

Método: En este estudio se evaluó el efecto de la fertilización con una enmienda orgánica (EO) procedente del compostaje de biorresiduos de origen municipal (BOM) mezclados con cachaza, sobre la mineralización del nitrógeno ($N_{\text{mineralizado}}$) de un suelo ácido, evaluando seis tratamientos (tres controles: T1: 100 % suelo; T2: 100 % EO; T3: 100 % urea-fertilización inorgánica: F) y 3 proporciones EO (%): F (%) (T4: 50-50, T5: 75-25, T6: 25-75) en un periodo de incubación de 16 semanas.

Resultados: Se aplicaron los modelos de mineralización de Stanford y Smith, Broadbent, Lineal y Polinomial-Exponencial, encontrándose que T4 permitió alcanzar un aporte de $N_{\text{mineralizado}}$ (12.546,39 mg/kg), el cual es un valor muy cercano al resultado obtenido por fertilización inorgánica (T3: 13.931,05 mg/kg); los modelos de Broadbent ($R^2 > 0,98$) y Lineal ($R^2 > 0,90$) alcanzaron los mejores ajustes.

Conclusiones: Esta estrategia de reemplazo parcial del fertilizante inorgánico puede lograr hasta un 50 % de reemplazo del fertilizante inorgánico.

Palabras clave: biorresiduos de origen municipal (BOM); cachaza; compostaje, mineralización de nitrógeno, urea

Agradecimientos: Agradecimientos: Los autores desean expresar su agradecimiento por el apoyo del proyecto C. I. 2985 de la Universidad del Valle.

Idioma: Español

1. Introducción

La intensificación de los sistemas agrícolas para satisfacer la creciente demanda de alimentos, ha generado una mayor demanda de fertilizantes, siendo la principal alternativa para suplir esta demanda la fertilización inorgánica, debido a la disposición inmediata de los nutrientes [1]. Sin embargo, esta creciente demanda de fertilizantes genera efectos negativos sobre el ambiente como la excesiva producción de residuos biodegradables y la degradación de los suelos [2], [3]. Autores indican que el uso excesivo de fertilizantes inorgánicos a largo plazo ha contribuido a reducir el contenido de materia orgánica y nutrientes del suelo, teniendo como consecuencia disminución de su calidad, acidificación y contaminación [4].

Una alternativa de fertilización con menores impactos ambientales [5], [6], es el uso de fertilizantes orgánicos como el compost proveniente de diferentes fuentes orgánicas [7]–[9] que puede mejorar algunas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo [10], [11] e incrementar la fertilidad del suelo de manera segura, con bajos costos [10], [12].

Entre los sustratos orgánicos de mayor aplicabilidad en el compostaje, se encuentra la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, conocidos como FORSU o BOM (biorresiduos de origen municipal) [13]. Esta estrategia de aprovechamiento de estos sustratos además permite mitigar los efectos negativos de su disposición final en rellenos sanitarios como la reducción del uso de áreas disponibles para disposición, que cada vez son más escasas [14] y la reducción en la ge-

neración de gases de efecto invernadero y lixiviados [15].

En el compostaje de BOM se recomienda su mezcla con otros sustratos para mejorar la calidad del producto final del compostaje [11], [16] encontrándose experiencias de compostaje de BOM con residuos agroindustriales como la cachaza (CA) [17], [18] resultante del procesamiento de la caña de azúcar [18], [19], cuyo producto final contribuye de manera importante con los requerimientos de N , que es el elemento más limitante y de mayor demanda en la agricultura, ya que es necesario para el crecimiento y desarrollo de las plantas del suelo [20]; sin embargo, metabólicamente no todo el N está disponible para la asimilación de las plantas y su aprovechamiento en los cultivos, debiendo pasar por un proceso de mineralización para ser asimilado por el suelo y así estar disponible para las plantas [21], [22]. Entre los modelos de mineralización evaluados se encuentran los mostrados en la Tabla I.

Tabla I. Ecuaciones modelos de mineralización

Modelos no lineales		
a. Simple exponencial	$N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	[37]
Modelos lineales / linealizables		
b. Parabólico	$N_t = At^b$	[38]
c. Lineal	$N_t = \beta_0 + \beta_1 t$	-
d. Polinomial (2)	$N_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2$	-
e. Exponencial	$N_t = Ae^{kt}$	-

Autores como [23] y [24], han realizado estudios donde proponen el uso de mezclas de compost de diversas fuentes orgánicas y fertilizante inorgánico, estrategia que aporta al desarrollo de una producción agrícola sostenible y un medio ambiente saludable [9].

Por lo anterior, el objetivo principal de esta investigación fue evaluar el efecto de la aplicación en un suelo ácido de diferentes proporciones de un fertilizante inorgánico (urea) y una enmienda procedente del co-compostaje de BOM:CA, sobre el proceso de mineralización del nitrógeno ($N_{\text{mineralizado}}$).

2. Materiales y métodos

La investigación se llevó a cabo en condiciones de invernadero con las siguientes características: Latitud 03° 22' 22,7" Norte, Longitud 76° 31' 47,9" Oeste, 995 msnm, temperatura media de 28°C, máxima de 32°C y mínima de 22°C y precipitación promedio anual de 900 mm [25]. El suelo utilizado fue un Andic Dystrudepts [26] del Valle del Cauca; la enmienda orgánica se obtuvo del producto final procedente del compostaje de BOM:CA en una proporción 80:20 [13]. En la Tabla II se presentan las propiedades del suelo y la enmienda orgánica empleadas, determinadas de acuerdo con [27], [28].

La unidad experimental (UE) para los ensayos de mineralización correspondió a bolsas de polietileno con dimensiones de 40 cm x 50 cm y capacidad de 2 kg. Cada UE se preparó con 1 kg de suelo, el cual fue tamizado a 2 mm, homogeneizado y cuarteado [29]. Para la conformación de

Tabla II. Propiedades del suelo y de la enmienda orgánica

Parámetro	Resultados análisis suelo	Resultados análisis enmienda orgánica (EO)	Unidades
Textura	Franco arcilloso	-	-
Densidad real (DR)	2,62 ± 0,53	-	Mg/m ³
Densidad aparente (DA)	0,98 ± 0,08	-	Mg/m ³
pH	5,1 ± 0,17	8,13 ± 0,47	-
CE	0,09 ± 0,01	0,38 ± 0,01	dS/m
CIC	81,75 ± 0,64	65,6 ± 3,10	cmol/kg
Carbono orgánico	13,47 ± 0,01	20,26 ± 0,10	%
Nitrógeno total (Nt)	0,27 ± 0,19	2,30 ± 0,2	%
Amonio (NH ₄ ⁺)	291,2 ± 0,03	-	mg/Kg
Nitrato (NO ₃ ⁻)	294,5 ± 0,14	-	mg/Kg

los tratamientos a evaluar, se utilizó un diseño unifactorial completamente al azar, evaluando como factor la influencia de la proporción de mezcla enmienda orgánica: fertilizante inorgánico-urea (EO: F) con tres niveles de estudio definidos, calculando las dosis en gramos a través de un balance de masa y partiendo de una dosis de 200 kg/ha de N para cada tratamiento [30]. Adicionalmente se contó con tres tratamientos control (testigos) como se muestra en la Tabla III, para un total de seis tratamientos, los cuales se evaluaron por triplicado.

Los tratamientos se incubaron ajustando la humedad a capacidad de campo (θ) en cada UE [31], este factor ayuda a representar la dinámica de mineralización de N del suelo y tiende a incrementarse cuando la humedad del suelo se aproxima a capacidad de campo y ayuda a no inhibir el proceso de nitrificación [32]. El resultado de la humedad a capacidad campo fue 50,09 %, porcentaje característico de suelos con presencia de arcillas [33] y se determinó a partir de la Ecuación (1), donde Vw corresponde al volumen de agua presente en la muestra (Vw) y volumen total de suelo (Vt).

$$\theta = \frac{Vw}{Vt} \cdot 100 \quad (1)$$

La humedad a capacidad de campo se monitoreó en cada UE, utilizando el medidor de humedad volumétrica de suelo TDR (Time Domain Reflectometry) [34]. El pH fue medido con un potenciómetro con el equipo pH meter Sartorius Portable - PT-10 y se tomó como una variable de respuesta, ya que es un indicador de la disponibilidad de N en el suelo. La forma aprovechable de N depende

Tabla III. Dosis de N por tratamiento por kg de suelo seco

Tratamiento	Configuración	Dosis Enmienda Orgánica (EO)** (g)	Dosis fertilizante inorgánico-urea (F) (g)
T1*	Testigo 1: Solo Suelo	-	-
T2*	Testigo 2: Suelo + EO	3,3	-
T3*	Testigo 3: Suelo + F	-	1,4
T4	Suelo + 50 % EO + 50 % F	1,7	0,72
T5	Suelo + 75 % EO + 25 % F	2,5	0,36
T6	Suelo + 25 % EO + 75 % F	0,8	1,08

* Testigos.

** Enmienda orgánica (EO): Producto final del compostaje de BOM: Cachaza - 80:20

del valor de pH, siendo el amonio utilizado con mayor facilidad en valores de $\text{pH} > 6$ unidades, mientras que el nitrato es absorbido con mayor facilidad en valores de $\text{pH} < 5$ [35].

El nitrógeno mineral o inorgánico se determinó en términos de amonio (NH_4^+) y nitratos (NO_3^-), cuya sumatoria corresponde a la forma de N disponible para la planta [21], el cual se midió semanalmente durante las primeras 12 semanas de muestreo y luego cada 15 días, hasta la semana 16 [36]. Los datos fueron usados para construir las curvas de mineralización a partir del valor promedio de las tres réplicas de cada tratamiento.

Para determinar el efecto de la proporción de mezcla EO: F sobre la mineralización del nitrógeno, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) considerando un nivel de significancia del 5 % y para determinar si existen diferencias significativas entre los tratamientos, se aplicó la prueba Post ANOVA de Tukey [24].

2.1. Modelos de mineralización

A partir de los datos experimentales y las curvas de mineralización, se evaluaron los modelos mostrados en la Tabla I. El ajuste de los parámetros correspondientes a cada modelo se realizó implementando el algoritmo de Newton Raphsson en la plataforma de R (R-3.4.2). Para la selección del mejor ajuste de cada modelo, se consideraron métricas como el coeficiente de determinación ajustado (R^2) y el cuadrado medio de error (CME), considerando que el mejor ajuste es aquel que maximiza el R^2 y simultáneamente minimiza el CME [22].

2.2. Resultados y discusión

Las Figuras 1, 2 y 3 muestran el comportamiento de las diferentes formas de nitrógeno (NH_4^+ , NO_3^- y $N_{\text{mineralizado}}$) durante las 16 semanas en los tratamientos evaluados. Para el NH_4^+ (Figura 1), los tratamientos T1 y T2 que corresponden a suelo sin aplicación y suelo más EO respectivamente, durante todo el tiempo presentaron un comportamiento homogéneo sin picos significativos, mientras que todos los tratamientos con F (urea) presentaron mayor liberación de NH_4^+ en las primeras siete semanas, donde se registraron los picos más altos.

Esto pudo deberse a que la urea se hidrolizó con rapidez por efecto de la enzima “ureasa” [39]. De la semana 14 a la 16, todos los tratamientos presentaron una disminución en el aporte de NH_4^+ , debido a que se están mineralizando los materiales más resistentes y que necesitan más tiempo para la descomposición por parte de los microorganismos [7]. La prueba ANOVA para el NH_4^+ mostró que en las semanas 1, 3, 5, 6, 7, 8 y 12, se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos (ver los valores de p y F en Tabla IV) y mediante la prueba Post ANOVA, se encontró que el tratamiento que aportó mayor NH_4^+ en las semanas 2 y 10 fue T6 (suelo + 25 % EO + 75 % urea) y en las semanas 4 y 16 fue T3 (100 % urea) seguido por T4 (suelo + 50 % EO + 50 % urea), con aportes de 324,6 y 224,2 mg/kg de NH_4^+ respectivamente. Los resultados encontrados sugieren que con la enmienda orgánica se puede disminuir la fertilización con urea hasta en un 50 % por el aporte de amonio [11].

Para el NO_3^- (Figura 2), esta forma de nitrógeno se encuentra fácilmente disponible principalmente entre las semanas 3, 6 y 12 [7]. El tratamiento que mayor NO_3^- aportó durante las 16 semanas fue T4 (suelo + 50 % EO + 50 % F), seguido por T3. El análisis de varianza mostró que las diferentes dosis de enmienda orgánica tuvieron un efecto significativo sobre el aporte de nitratos para las semanas 3, 4, 6, 10, 12, 14 y 16 respectivamente (ver los valores de p y F se presenta en Tabla IV). La prueba de Tukey permitió evidenciar que, aunque el tratamiento que aportó mayor NO_3^- en la última semana fue T3 (100 % urea), fue seguido de T6 (suelo + 25 % EO + 75 % urea), con aportes de 402,8 y 268,8 mg/ kg respectivamente, resultado que es similar al encontrado en otras investigaciones [24].

Tabla IV. Valores de p y F entre tratamientos en Amonio y Nitrato

Semana	Amonio		Nitrato	
	F	p	F	p
1	9,460	0,001	0,510	0,765
2	2,450	0,095	1,640	0,224
3	14,710	0,000	7,640	0,002
4	2,390	0,101	3,990	0,023
5	4,120	0,021	2,980	0,056
6	37,950	0,000	12,200	0,000
7	14,390	0,000	2,550	0,086
8	3,650	0,031	2,710	0,073
10	1,600	0,234	3,400	0,038
12	12,990	0,000	6,760	0,003
14	0,470	0,793	3,540	0,034
16	2,220	0,119	5,500	0,007

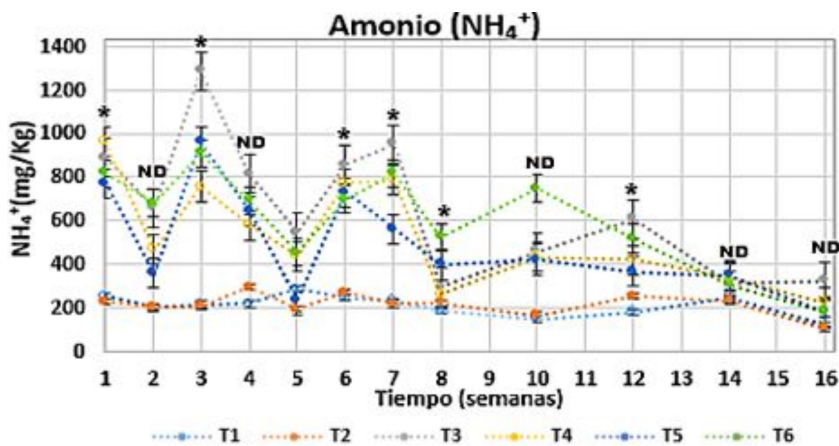


Figura 1. Comportamiento del NH_4 durante las 16 semanas ND: No presentó diferencia significativa; *presentó diferencia significativa

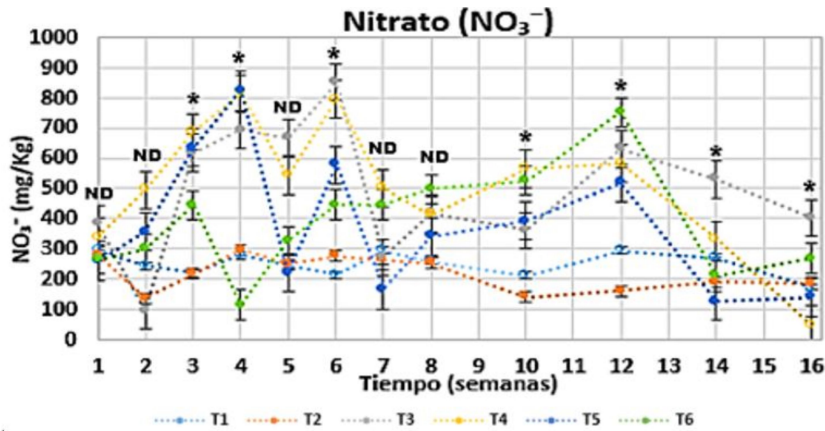


Figura 2. Comportamiento del NO_3^- durante las 16 semanas ND: No presentó diferencia significativa; *presentó diferencia significativa

Con relación al $N_{\text{mineralizado}}$ (Figura 3), en las primeras 8 semanas se observó una mayor mineralización del N en todos los tratamientos, evidenciado por los picos más altos de las curvas [11], [36]; de la semana 8 a la semana 12, la mineralización se comportó de forma más estable, mientras que a partir de la semana 12 se presentó un descenso, comportamiento que es similar a otros estudios con otro tipo de enmiendas orgánicas como el lombricompost y la gallinaza [36].

La Figura 4 muestra el comportamiento del pH, el cual se incrementó en todos los tratamientos conformados con urea durante las dos primeras semanas T3 (100 % urea), T4 (suelo + 50 % EO + 50 % urea), T5 (suelo + 75 % EO + 25 % urea) y T6 (suelo + 25 % EO+ 75 % urea), lo que se debe a que la concentración del N de este fertilizante (46 %) al ser aplicado al suelo, produce la

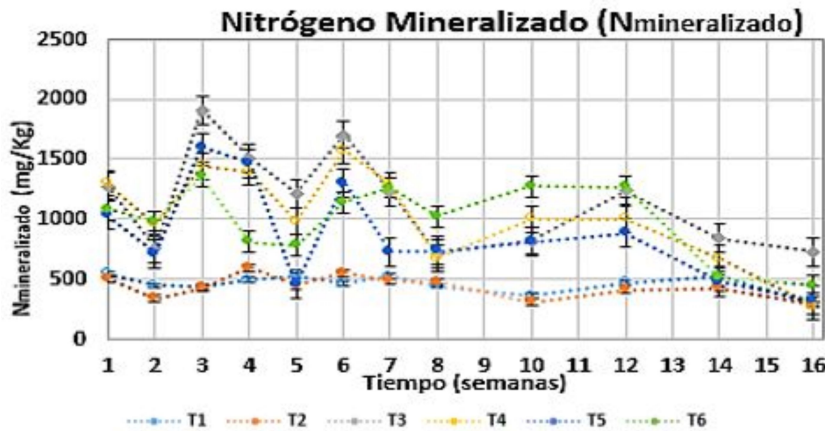


Figura 3. Comportamiento del $N_{\text{mineralizado}}$ durante las 16 semanas ND: No presentó diferencia significativa; *presentó diferencia significativa

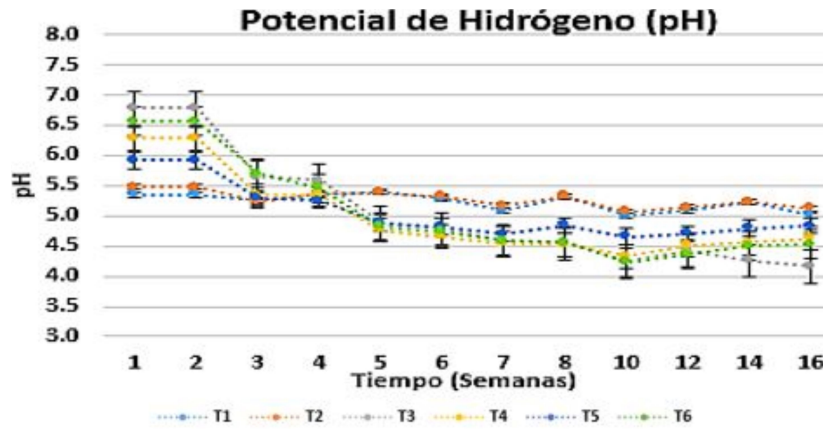


Figura 4. Comportamiento del pH durante las 16 semanas ND: No presentó diferencia significativa; *presentó diferencia significativa

hidratación del gránulo y su disolución y la ureasa bacteriana, enzima presente en los suelos, produce el desdoblamiento de la molécula en CO_3NH_4 (carbonato de amonio) y CO (monóxido de carbono) que es inestable, ocasionando hidrólisis de forma instantánea, generando un aumento del pH debido a la producción de amoníaco [40]; sin embargo, a partir de la semana 3 se evidenció una disminución del pH debido a la acción acidificante del fertilizante [41]–[43].

En contraste, los tratamientos sin urea (T1: Suelo sin aplicación y T2: 100 % EO), durante las 16 semanas, presentaron poca variabilidad en sus datos, teniendo un comportamiento más homogéneo. T2 no presentó diferencias significativas con respecto T1, que era el testigo absoluto, solo se mantuvo un 0,93 % por encima de los valores reportados por este tratamiento.

Con relación al $N_{\text{mineralizado}}$ acumulado durante las 16 semanas, en la Figura 5 se observa que en T3 (100 % urea) se alcanzó el mayor aporte de $N_{\text{mineralizado}}$ durante las 16 semanas y T4 (suelo + 50 % EO + 50 % urea) se comportó de manera similar, con una diferencia del aporte al final de la incubación de apenas el 9,94 %, lo que indica el potencial de la enmienda orgánica como reemplazo parcial de la fertilización química, pudiendo aportar tanto desde el punto de vista ambiental como económico [44]. Este resultado es similar al encontrado por otros autores [24], quienes afirmaron que los tratamientos con 100 % fertilizante mineral y 50 % fertilizante mineral y 50 % Compost (esquejes verdes, fracción orgánica de desechos municipales y otros materiales orgánicos), mostraron eficiencias similares en el uso de nitrógeno por parte de las plantas, debido a la disponibilidad relativamente inmediata de nitrógeno suministrado.

2.3. Modelos de mineralización

En la Figura 6 se observa el ajuste de los modelos matemáticos que describen el proceso de la mineralización del N para cada tratamiento y en las Tablas V a X se muestran los resultados de la modelación de la mineralización en cada tratamiento, con sus respectivos parámetros y errores.

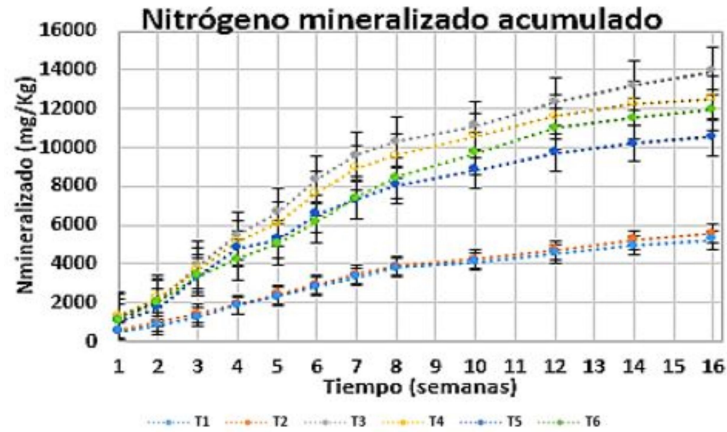


Figura 5. Nitrógeno mineralizado ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) acumulados durante las 16 semanas

De acuerdo con estos resultados, se observa que el modelo Exponencial Simple planteado por Stanford y Smith sobrestima significativamente el $N_{\text{mineralizado}}$ acumulado máximo observado en cada uno de los tratamientos, evidenciado también en los altos valores del cuadrado medio de error CME y el modelo polinomial de segundo grado fue el que presentó mejores valores de Coeficiente de determinación ($R^2 > 0,99$) en la dinámica de la mineralización del N; Sin embargo, en algunos de los tratamientos evaluados presentó parámetros no significativos ($p > 0,05$); en consecuencia, no es posible asegurar con una confianza del 95 %, que este modelo es el mejor predictor de la mineralización del N. Por lo anterior, los modelos Exponencial de Stanford y Smith y Polinomial de segundo grado se descartaron.

Los modelos de mejor ajuste en su orden fueron, parabólico de Broadbent ($R^2 > 0,80$), lineal ($R^2 > 0,80$) y Exponencial, siendo este último el que presentó el menor ajuste para los tratamientos conformados con EO y F (T1, T2 y T6), que arrojaron valores de coeficiente de determinación ($R^2 > 0,80$) y T3, T4 y T5 presentaron $R^2 < 0,80$. En el caso del modelo lineal, este presentó valores altos del cuadrado medio de error CME y mayor dispersión en los datos, mientras que el modelo parabólico (Broadbent), presentó buen ajuste como en otros casos de diferentes EO como Compost de rosas, gallinaza, conejaza, porquinaza lombricompost, entre otros evaluados [7], [22], [36]. Analizando el comportamiento de los modelos reportados en la literatura y los resultados del presente estudio, se ratifica la necesidad de evaluar en cada caso diferentes modelos, para analizar el que mejor represente la mineralización del nitrógeno, esto debido a que cada enmienda, dependiendo de donde proviene y del suelo aplicado su comportamiento, es diferente y estos modelos fueron realizados para ajustarse a características muy específicas.

Evaluación de la mineralización del nitrógeno en un suelo ácido bajo fertilización inorgánica y orgánica

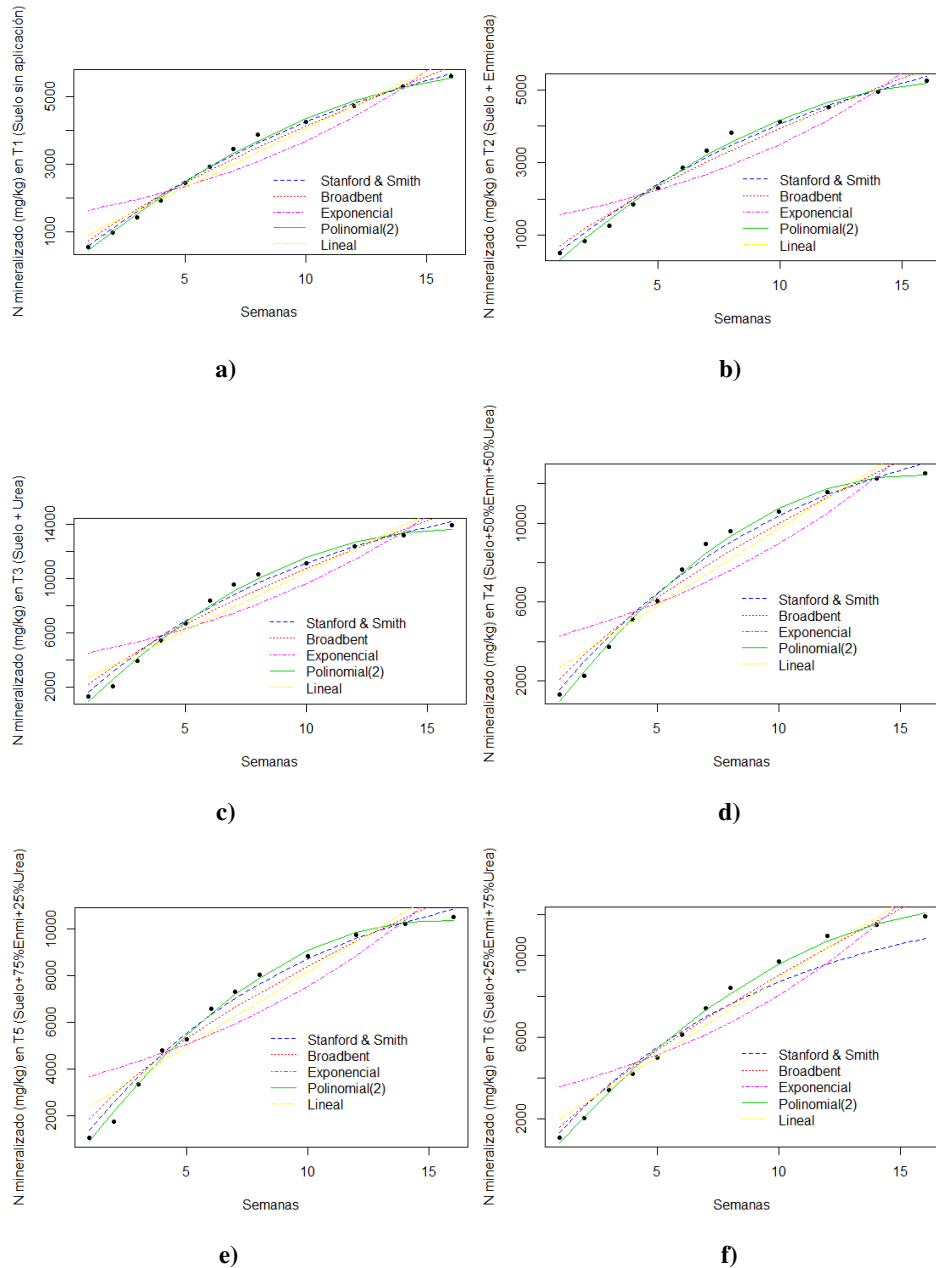


Figura 6. Modelos matemáticos de mineralización del Nitrógeno. a). T1; b). T2; c). T3; d). T4; e). T5; f). T6.

Tabla V. Parámetros y errores en los modelos para el T1 (Testigo 1 (Suelo sin aplicación))

Modelo	Parámetros	Estimación	p	R ² ajustado	CME
Exponencial simple (Stanford y Smith) $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	N0	8287	4,20E-08	0,9942	17.939
	k	0,0719	1,87E-06		
Parabólico (Broadbent) $N_t = At^b$	A	742,9	9,82E-07	0,9802	5,545
	B	0,7433	3,97E-09		
Exponencial $N_t = Ae^{kt}$	A	1506	5,47E-05	0,8436	43,77
	k	0,0888	2,73E-05		
Polinomial (Grado 2) $N_t = \beta_0 + \beta_1t + \beta_2t^2$	B0	*-129,1	0,232	0,9955	1,152
	B1	598,7	6,68E-09		
	B2	-15,23	7,81E-06		
Lineal $N_t = \beta_0 + \beta_1t$	B0	612,5	0,00919	0,9557	12,4
	B1	340,6	1,87E-08		

*Parámetro no significativo (p > 0,05)

Tabla VI. Parámetros y errores en los modelos para el T2 (Testigo 2 (Suelo +EO))

Modelo	Parámetros	Estimación	p	R ² ajustado	CME
Exponencial simple (Stanford y Smith) $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	N0	7601	7,33E-07	0,9881	34.224
	k	0,0763	3,30E-05		
Parabólico (Broadbent) $N_t = At^b$	A	710,1	1,04E-05	0,9693	8,077
	B	0,7438	5,37E-08		
Exponencial $N_t = Ae^{kt}$	A	1444	0,000113	0,8207	47,12
	k	0,0852	6,46e-05		
Polinomial (Grado 2) $N_t = \beta_0 + \beta_1t + \beta_2t^2$	B0	*-259,3	0,0637	0,9928	17,05
	B1	617,4	2,86e-08		
	B2	-17,3	1,37e-05		
Lineal $N_t = \beta_0 + \beta_1t$	B0	567,3	0,0236	0,9415	15,37
	B1	327,8	1,07e-07		

*Parámetro no significativo (p > 0,05)

Tabla VII. Parámetros y errores en los modelos para el T3 (Testigo 3 (Suelo + F))

Modelo	Parámetros	Estimación	p	R ² ajustado	CME
Exponencial simple (Stanford y Smith) $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	N0	18.200	2,02E-07	0,9846	314.598
	K	0,0948	2,19E-05		
Parabólico (Broadbent) $N_t = At^b$	A	2.157	2,76E-05	0,956	81,17
	B	0,698	3,07E-07		
Exponencial $N_t = Ae^{kt}$	A	4.152	0,000152	0,786	397,6
	K	0,08384	0,000151		
Polinomial (Grado 2) $N_t = \beta_0 + \beta_1t + \beta_2t^2$	B0	-820	0,0477	0,9913	14,52
	B1	1.806	2,80E-08		
	B2	-56,52	5,43E-06		
Lineal $N_t = \beta_0 + \beta_1t$	B0	1.881	0,021	0,9137	160,3
	B1	859,9	7,57E-07		

*Parámetro no significativo (p > 0,05)

3. Conclusiones

Se observó que la aplicación del composts evaluado, es una adecuada fuente de fertilizante nitrogenado, con la que se puede lograr hasta un 50 % de reemplazo del fertilizante inorgánico (50 %

Tabla VIII. Parámetros y errores en los modelos para el T4 (Suelo + 50 % EO + 50 % F)

Modelo	Parámetros	Estimación	p	R ² ajustado	CME
Exponencial simple (Stanford y Smith) $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	N0	16.290	5,03E-08	0,9862	232.979
	K	0,1011	7,85E-06		
Parabólico (Broadbent) $N_t = At^b$	A	2.091	2,26E-05	0,9548	69,51
	B	0,679	3,29E-07		
Exponencial $N_t = Ae^{kt}$	A	3.955	0,000133	0,7792	339,4
	K	0,08149	0,000173		
Polinomial (Grado 2) $N_t = \beta_0 + \beta_1t + \beta_2t^2$	B0	-670	0,0233	0,9951	68,37
	B1	1.686	1,86E-09		
	B2	-54,09	3,27E-07		
Lineal $N_t = \beta_0 + \beta_1t$	B0	1.914	0,014	0,908	140,4
	B1	780,2	1,01E-06		

*Parámetro no significativo ($p > 0,05$)**Tabla IX.** Parámetros y errores en los modelos para el T5 (Suelo + 75 % EO + 25 % F)

Modelo	Parámetros	Estimación	p	R ² ajustado	CME
Exponencial simple (Stanford y Smith) $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	N0	13.160	1,16E-08	0,9876	143.142
	K	0	2,74E-06		
Parabólico (Broadbent) $N_t = At^b$	A	1838,000	1,81E-05	0,9541	48,34
	B	1	0,000000		
Exponencial $N_t = Ae^{kt}$	A	3392,00000	0,000120	0,7735	48,34
	K	0	0,0002		
Polinomial (Grado 2) $N_t = \beta_0 + \beta_1t + \beta_2t^2$	B0	*-484,1	5,47E-02	0,9943	54,49
	B1	1421,00	3,10E-09		
	B2	-46	0,000		
Lineal $N_t = \beta_0 + \beta_1t$	B0	1733,0	1,06E-02	0,9016	103,7
	B1	643,8	1,47E-06		

*Parámetro no significativo ($p > 0,05$)**Tabla X.** Parámetros y errores en los modelos para el T6 (Suelo + 25 % EO + 75 % F)

Modelo	Parámetros	Estimación	p	R ² ajustado	CME
Exponencial simple (Stanford y Smith) $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	N0	18.370	5,65e-07	0,9906	144.965
	K	0,0708	2,05e-05		
Parabólico (Broadbent) $N_t = At^b$	A	1.589	4,82e-06	0,9749	35,27
	B	0,756	1,96e-08		
Exponencial $N_t = Ae^{kt}$	A	3.290	9,26e-05	0,8322	235,5
	K	0,0895	4,70e-05		
Polinomial (Grado 2) $N_t = \beta_0 + \beta_1t + \beta_2t^2$	B0	-520,1	0,0493	0,9953	59,43
	B1	1.381	5,85e-09		
	B2	-37	4,50e-06		
Lineal $N_t = \beta_0 + \beta_1t$	B0	1.248	0,0195	0,9512	68,44
	B1	761,2	4,29e-08		

*Parámetro no significativo ($p > 0,05$)

EO + 50 % F), condición con la que se alcanzó un aporte total de $N_{\text{mineralizado}}$ de 12.546,39 mg/kg al final de las 16 semanas, valor muy similar al obtenido con la aplicación de solo fertilizante inorgánico (13.931,05 mg/kg), que representa una diferencia de apenas el 9,94 %. Esta estrategia de reemplazo parcial del fertilizante inorgánico, además, puede aportar a la reducción de costos de

producción agrícola, así como a la mitigación de los efectos ambientales y sobre el suelo por el uso excesivo de fertilizantes químicos. Además, las características de la EO ayudaron a mantener estable el valor de pH del suelo, evitando niveles de acidificación mayor como los que se presentaron con los tratamientos que contenían urea.

Para este caso, el modelo parabólico de Broadbent y el lineal, que presentaron los mejores ajustes, con valores del coeficiente de determinación (R²) mayores al 80%; sin embargo, es recomendable en cada caso, evaluar diferentes modelos para identificar el que mejor represente este mecanismo.

Referencias

- [1] P. Heffer, and M. Prud'homme, "Outlook for world fertilizer demand, supply, and supply/demand balance", *Journal of Agriculture and Forestry*, vol. 32, no.3, pp. 159-164, 2008. ↑198
- [2] R. Lal, "Soils and sustainable agriculture. A review", *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 28, pp. 57-64, 2008. <https://doi.org/10.1051/agro:2007025> ↑198
- [3] M. J. Eckelman, W. Ashton, Y. Arakaki, K. Hanaki, S. Nagashima, and L. C. Malone-Lee, "Island waste management systems: Statistics, challenges, and opportunities for applied industrial ecology", *Journal of Industrial Ecology*, vol. 18, no. 2, pp. 306-317, 2014. <https://doi.org/10.1111/jieec.12113> ↑198
- [4] N. Chuan-chuan, G. Peng-dong, W. Bing-qing, L. Wei-peng, J. Ni-hao, and C. Kun-zheng, "Impacts of chemical fertilizer reduction and organic amendments supplementation on soil nutrient, enzyme activity and heavy metal content", *Journal of Integrative Agriculture*, vol. 16, no. 8, pp. 1819-1831, 2017. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61476-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61476-4) ↑198
- [5] A. D. Armenta-Bojórquez, C. García-Gutiérrez, J. R. Camacho-Báez, M. Á. Apodaca-Sánchez, L. Gerardo-Montoya y E. Nava-Pérez, "Biofertilizantes en el desarrollo agrícola de México", *Ra Ximhai*, vol. 6, no. 1, pp. 51-56, 2010. ↑198
- [6] D. Ramos Agüero y E. Terry Alfonso, "Generalidades de los abonos orgánicos: importancia del Bocashi como alternativa nutricional para suelos y plantas", *Cultivos Tropicales*, vol. 35, no. 4, pp. 52-59, 2014. ↑198
- [7] A. Figueroa-Barrera, J. G. Álvarez-Herrera, A. Forero, C. Salamanca y L. Pinzón, "Determinación del nitrógeno potencialmente mineralizable y la tasa de mineralización de nitrógeno en materiales orgánicos", *Temas Agrarios*, vol. 17, no. 1, pp. 32-43, 2012. <https://doi.org/10.21897/rta.v17i1.694> ↑198, 201, 202, 205
- [8] J. I. Mardomingo, R. P. Soler, M. Á. Casermeiro, M. T. de la Cruz y A. Polo., "Seasonal changes in microbial activity in a semiarid soil after application of a high dose of different organic amendments", *Geoderma*, vol. 206, pp. 40-48, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.04.025> ↑198
- [9] Z. Mukhtamar, D. Putri, and N. Setyowati, "Reduction of synthetic fertilizer for sustainable agriculture: Influence of organic and nitrogen fertilizer combination on growth and yield of green mustard", *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 361-364, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.18517/ijaseit.6.3.802> ↑198, 199
- [10] M.K. Abbasi, and A. Khizar, "Microbial biomass carbon and nitrogen transformations in a loam soil amended with organic-inorganic N sources and their effect on growth and N-uptake in maize", *Ecological Engineering*, vol. 39, pp.123-132, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.12.027> ↑198
- [11] A. Kelley, A. C. Wilkie, and G. Maltais-Landry, "Food-based composts provide more soil fertility benefits than cow manure-based composts in sandy soils", *Agriculture*, vol. 10, no. 69, pp. 1-12 2020. <https://doi.org/10.3390/agriculture10030069> ↑198, 199, 201, 203
- [12] J. E. Gilly, and B. Eghball, "Residual effects of compost and fertilizer applications on nutrients in runoff", *Biological Systems Engineering*, vol. 45, no. 6, pp. 1905-1910, 2002. ↑198
- [13] J. Soto-Paz, E. R. Oviedo-Ocaña, P. C. Manyoma, L. F. Marmolejo-Rebellón, P. Torres-Lozada, R. Barrera, A. Sanchez, and D. Komilis, "Influence of mixing ratio and turning frequency on the co-composting of biowaste with sugarcane filter cake: A mixture experimental design", *Waste and Biomass Valorization*, vol. 11, pp. 2475- 2489 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00592-2> ↑198, 199
- [14] K. Varón, J. P. Orjuela y P. C. Manyoma, "Modelo matemático para la ubicación de estaciones de transferencia de residuos sólidos urbanos", *Escuela de Ingeniería de Antioquia*, vol. 12, no. 23, pp. 61-70, 2015. ↑198

- [15] S. Mirmohamadsadeghi, K. Karimi, M. Tabatabaei, and M. Aghbashlo, "Biogas production from food wastes: A review on recent developments and future perspectives", *Bioresource Technology Reports*, vol. 7, pp. 1-10, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100202> ↑199
- [16] E. R. Oviedo-Ocaña, L. F. Marmolejo-Rebellón y P. Torres-Lozada, "Avances en investigación sobre elcompostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. Lecciones desde Colombia", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 18, no. 1, pp. 31-42, 2017. <http://dx.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2017.18n1.003> ↑199
- [17] R. Basanta, M. A. García Delgado, J. E. Cervantes Martínez, H. Mata Vázquez y G. Bustos Vázquez, "Sostenibilidad del reciclaje de residuos de la agroindustria azucarera: una revisión", *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, vol. 5, no. 4, pp. 293-305, 2009. <https://doi.org/10.1080/11358120709487704> ↑199
- [18] A. Bohórquez, Y. Puentes y J. C. Menjivar, "Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar", *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, vol. 15, no. 1, pp. 73- 81, 2014. https://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num1_art:398 ↑199
- [19] S. Meunchang, S. Panichsakpatana, and R. W. Weaver, "Co-composting of filter cake and bagasse; by- products from a sugar mill", *Bioresource Technology*, vol. 96, no. 4, pp. 437-442, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.05.024> ↑199
- [20] L. M. Melgarejo (Editora), *Experimentos en fisiología vegetal*. Colombia, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2010. ↑199
- [21] H. Celaya-Michel y A. E. Castellanos-Villegas, "Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semi-áridas", *Terra Latinoamericana*, vol. 29, no. 3, pp. 343-356, 2011. ↑199, 201
- [22] J. A. Silva, P. Torres y J. Mosquera, "Evaluación de la mineralización de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas", *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 17, no. 4, pp. 434-442, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000400012> ↑199, 201, 205
- [23] E. Abreu Cruz, E. Araujo Camacho, S. L. Rodríguez Jiménez, A. L. Valdivia Ávila, L. Fuentes Alfonso and Y. Pérez Hernández, "Efecto de la aplicación combinada de fertilizante químico y humus de lombriz en *Capsicum annum*", *Centro Agrícola*, vol. 45, no. 1, pp. 52-61, 2018. ↑199
- [24] C. Maucieri, A. Barco, and M. Borin, "Compost as a substitute for mineral N fertilization? Effects on crops, soil and N leaching", *Agronomy*, vol. 9, no. 4, pp. 1-16, 2019. <https://doi.org/10.3390/agronomy9040193> ↑199, 201, 202, 204
- [25] IDEAM. Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM, 2019. <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Cat-logo-Nacional-de-Estaciones-del-IDEAM/hp9r-jxuu/data> ↑199
- [26] IGAC - CVC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi - Corporación Autónoma Regional del Valle). *Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del Departamento del Valle del Cauca*, Tomo I, p. 541, 2004. ↑199
- [27] ICONTEC. Norma Técnica Colombiana 5167. Productos para la industria agrícola, productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo, 2004. ↑199
- [28] IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi. *Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos*. Sexta edición. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá, 2006. ↑199
- [29] D. M. Solórzano, P. Brenes y W. Peña, "Mineralización de nitrógeno de rastrojo de vainica (*Phaseolus vulgaris*) en un suelo andisol tropical", *Cuadernos de Investigación UNED*, vol. 11, no. 3, pp. 388-394, 2019. <https://doi.org/10.22458/urj.v11i3.2700> ↑199
- [30] N. J. Montaña Mata, J. A. Simosa Mallé y A. J. Perdomo Gallardo, "Respuesta de tres cultivares de berenjena (*Solanum melongena* L.) a diferentes combinaciones de fertilizante orgánico y fertilizante químico", *UDO Agrícola*, vol. 9, no. 4, pp. 807-815, 2009. ↑200
- [31] FAO - Food and Agriculture Organization. Glosario de términos sobre humedad del suelo, 2005. <http://www.fao.org/docrep/008/y4690s/y4690s02.htm#bm02> ↑200
- [32] X. Videla, A. M. Parada, A. Nairo, I. Pino y R. Hood, "Efecto del contenido de agua en la mineralización bruta e inmovilización de nitrógeno", *Agricultura Técnica*, vol. 65, no. 1, pp. 74-78, 2005. ↑200
- [33] D. Hillel, *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier, 2003 <https://www.sciencedirect.com/book/9780123486554/introduction-to-environmental-soil-physics> ↑200
- [34] K. Largaespada y C. Henríquez, "Distribución espacial de la humedad y su relación con la textura en un suelo", *Agronomía Costarricense*, vol. 39, no. 3, pp. 137-147, 2015. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v39i3.21814> ↑200
- [35] M. Toledo, *Manejo de suelos ácidos de las zonas altas de Honduras: Conceptos y métodos*, Honduras: IICA,

2016. <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/3108/BVE17069071e.pdf;jsessionid=0A1640F17AB005C51C008A79E209585A> ↑201
- [36] B. M., Montoya Gómez, M. C. Daza y N. Urrutia Cobo, “Evaluación de la mineralización de nitrógeno en dos abonos orgánicos (lombricompost y gallinaza)”, *Suelos Ecuatoriales*, vol. 47, no. 1 y 2, pp. 47-52, 2017. ↑ 201, 203, 205
- [37] G. Stanford, and S. J. Smith, “Nitrogen mineralization potentials of soil”, *Soil Science Society of America Journal*, vol. 36, pp. 465-471, 1972. ↑199
- [38] F. E. Broadbent, “Empirical modeling of soil nitrogen mineralization”, *Soil Science*, vol. 141, pp. 208-213, 1986. ↑199
- [39] J. P. Flores Márquez, B. Corral Díaz, P. Osuna Ávila y A. I. Flores Arras, “Respuesta agronómica y edáfica a la aplicación de biosólidos en el cultivo algodónero en el Valle de Juárez, Chihuahua”, *Ciencia en la frontera*, vol. 14, pp. 75-88, 2016. ↑201
- [40] R. Melgar, Guía 2012: Fertilizantes, enmiendas y productos nutricionales. Argentina: Fertilizar Asociación Civil, 2012. ↑204
- [41] Cenicafé, “Causas de la acidez”, *La acidez del suelo, un limitante común para la producción del café*, Colombia: Centro Nacional de Investigaciones del Café Cenicafé, 2016. ↑204
- [42] G. A. Divito, H. R. Sainz Rozas, H. E. Echeverría, G. A. Studdert, and N. Wyngaard, “Long term nitrogen fertilization: Soil property changes in an Argentinean Pampas soil under no tillage”, *Soil & Tillage Research*, vol. 114, no. 2, pp. 117-126, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.04.005> ↑204
- [43] N. Wyngaard, H. E. Echeverría, H. R. Sainz Rozas, and G. A. Divito, “Fertilization and tillage effects on soil properties and maize yield in a Southern Pampas Argiudoll”, *Soil & Tillage Research*, vol. 119, pp. 22-30, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.12.002> ↑204
- [44] O. S. Hanserud, F. Cherubini, A. F. Øgaard, D. B. Müller, and H. Brattebø, “Choice of mineral fertilizer substitution principle strongly influences LCA environmental benefits of nutrient cycling in the agri-food system”, *Science of the Total Environment*, vol. 615, pp. 219-227, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.215> ↑204

Luz Karime Torres Lozada

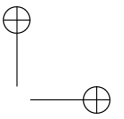
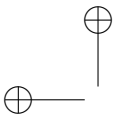
Ingeniera agrícola, Universidad del Valle, 2019. Magister en logística y gestión de las cadenas de abastecimiento, 2021. Actualmente asistente de docencia estudiante de doctorado ingeniería con énfasis en ingeniería industrial en la Universidad del Valle. Experiencia como docente tiempo completo y dirección de programa de ingeniería agrícola fundación universitaria Unisangil. Líneas de investigación: uso de suelo, cadenas de suministro agrícolas, cultivos, aprovechamiento de residuos orgánicos. [CvLAC](#)
Correo electrónico: luz.torres.lozada@correounivalle.edu.co

Duvan Escobar Medina

Ingeniero agrícola, Universidad del Valle, 2019. Experiencia en investigación asociada aprovechamiento de residuos orgánicos. Líneas de investigación: agricultura orgánica, suelo, aprovechamiento de residuos orgánicos.
Correo electrónico: duvan.escobar@correounivalle.edu.co

Jonathan Soto Paz

Ingeniero sanitario y ambiental, Universidad del Valle, 2014. Doctor en ingeniería con énfasis en ingeniería sanitaria y ambiental, 2020 Líneas de investigación: aprovechamiento de residuos orgánicos, residuos sólidos y suelos.
Correo electrónico: jonathan.soto.paz@correounivalle.edu.co



Martha Constanza Daza Torres

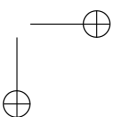
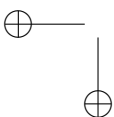
Ingeniería agrícola, Universidad Nacional, 1997 Doctora en ingeniería con énfasis en ingeniería sanitaria y ambiental, 2019 Docente asociada Universidad del Valle Investigador Asociado Minciencias Líneas de investigación: abonos orgánicos, degradación de suelos, manejo y conservación de suelos, gestión integral del recurso hídrico, buenas prácticas agrícolas. [CvLAC](#)

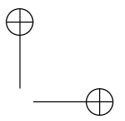
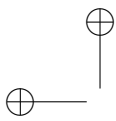
Correo: martha.daza@correounivalle.edu.co

Patricia Torres Lozada

Ingeniería sanitaria, Universidad del Valle, 1988. Doctora ingeniería civil: hidráulica y saneamiento, Universidad de Sao Paulo, 2001. Profesora titular Universidad del Valle. Investigador Senior Minciencias, Líder del grupo de investigación ECCA - Estudio y Control de la Contaminación Ambiental Líneas de investigación: calidad y tratamiento de aguas, tratamiento de aguas residuales, residuos sólidos y suelos. [CvLAC](#)

Correo electrónico: patricia.torres@correounivalle.edu.co





Research

REVISTA
Ingeniería

A Proposal for Improving the Essence Standard by Using Terminology Unification

Una propuesta de mejoramiento del estándar Essence mediante el uso de unificación terminológica

Carlos Mario Zapata-Jaramillo*¹, **Antony Henao-Roque**¹

¹Universidad Nacional de Colombia (Medellín-Colombia).
correspondence email: cmzapata@unal.edu.co

Recibido: 29/05/2020. Modificado: 27/08/2020. Aceptado: 27/05/2021.

Abstract

Context: SEMAT (Software Engineering Method and Theory) is promoting a software engineering theory with adequate terminology to improve the transference of methods and practices between teams. Terminologies should be uniform in order to eliminate ambiguity, improve communication among teams, and support new concepts.

Method: The process of reaching uniformity is called terminology unification. In this paper we propose a method for improving the Essence standard based on terminology unification. This method comprises four stages: selection of base models and definitions for structuring terms, identification of terminology problems by comparing the base models and definitions, unification of terms among the base models and definitions, and measurement of the gap between the current standard terms and the proposed changes.

Results: We propose a set of modifications to the Essence standard in constructs like: alpha state cards, relationships among alphas, and names of activity spaces.

Conclusions: By solving such conflicts, we can define a common, unambiguous terminology for software engineering teams.

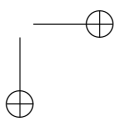
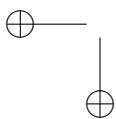
Keywords: Essence standard, uniformity problems, terminology problems, terminology unification.

Language: English

Open access



Cite this paper as: Zapata-Jaramillo, C. M. and Henao-Roque, A.: A Proposal for Improving the Essence Standard by Using Terminology Unification. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 2, pp. 213-232 (2021).
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
<https://doi.org/10.14483/23448393.16428>



Resumen

Contexto: En *SEMAT (Software Engineering Method and Theory)* se promueve una nueva teoría de la ingeniería de software con terminología apropiada para mejorar la transferencia de métodos y prácticas entre equipos. La terminología debe ser uniforme para eliminar la ambigüedad, mejorar la comunicación entre equipos y apoyar el surgimiento de nuevos conceptos.

Método: Al proceso para alcanzar uniformidad se le denomina unificación terminológica. En este artículo se propone un mejoramiento del estándar *Essence* basado en la unificación terminológica. Este método comprende cuatro etapas: selección de modelos base y definiciones para estructurar términos, identificación de problemas terminológicos comparando las bases y definiciones, unificación de términos con base en los modelos y definiciones y medición de la brecha entre los términos actuales del estándar y los cambios propuestos.

Resultados: Se propone un conjunto de modificaciones al estándar *Essence* en constructos como cartas de estado de los alfas, relaciones entre los alfas y nombres de los espacios de actividad.

Conclusiones: Al corregir estos conflictos, es posible definir una terminología común y sin ambigüedades para todos los equipos de ingeniería de software.

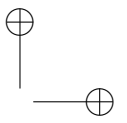
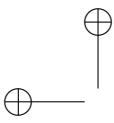
Palabras clave: Estándar *Essence*, problemas de uniformidad, problemas terminológicos, unificación terminológica.

Idioma: Inglés

1. Introduction

Teams are creating methods and practices in order to address the growing demand of the software engineering industry, so they can produce high quality software on time and on budget [1]–[5]. However, some circumstances in running the software engineering endeavor lead teams to continuously tailoring their own methods and practices, so the previously gained knowledge is abandoned. Consequently, knowledge transference among teams is getting harder [1], [6]–[8]. Aiming to improve such transference, the SEMAT (Software Engineering Method and Theory) community is promoting a software engineering theory (the Essence standard) which is focused on identifying universal elements covering all software engineering endeavors. Such elements are expressed in terms of a simple and structured language, thus allowing for the definition of methods and practices, so they can be easily transferred, tailored, measured, and compared among teams [6], [7]. Universal elements forming the Essence Kernel are known as alphas, activity spaces, and competencies. Software engineering as a discipline includes a set of concepts for easing communication among teams. Such concepts are included into the specific terminology for software engineering [6].

Nedobity [9] warns about human-to-machine and machine-to-machine communication problems arising from deficient terminologies. Accordingly, a theory with uniformity problems is unable to provide guidance to the procedures of a discipline. Such a problem generates gaps between the real progress of the team and the progress assessed by the theory. According to Cabré [10], a theory should have three degrees of adequacy: observational, descriptive, and predictive. Since some of the elements of the theory lack uniformity, theories fail to reach such degrees, and they are unable to support new concepts generated within a discipline. Also, lack of uniformity is associated with the impossibility to compare information in the documents of a discipline [11]. The process aimed to eliminate ambiguity and improve the communication among teams is called terminology



unification [10]. Some terminology problems are reported in domains like nursing [11], research and teaching [12], archive [13], automotive industry [14], and natural language requirements [15]. Such problems can be so severe that they sometimes need the intervention of governmental offices in order to achieve terminological systems [16].

We can find terminology problems in both the Essence standard and the language in which it is described [17], [18]. Constructs and definitions are affected by such problems. Consequently, in this paper we apply terminology unification to the Essence standard by selecting some base models and definitions for structuring terms, identifying disunited terms by comparing the base models and definitions, unifying terms among the base models and definitions, and measuring the gap between the current standard terms and the proposed changes. We can turn the Essence standard into a uniform theory that allows for the completion of the Essence kernel by solving such problems. Furthermore, a uniform terminology should help avoid ambiguity and improve communication among people and teams practicing the software engineering discipline.

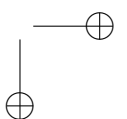
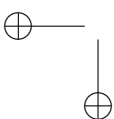
This paper is organized as follows: in Section 2, we describe the Essence Kernel and its full set of elements; in Section 3, we present a review of terminology problems in some domains; in Section 4, we improve the Essence standard by applying terminology unification; and finally, we discuss some conclusions and future work in Section 5.

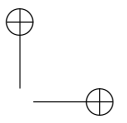
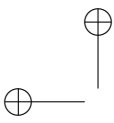
2. Theoretical framework

Growth of the software engineering industry has launched the need for creating new development teams with skills enough to supply high-quality, on-time, and on-budget software systems for covering the industry demand [1]–[5]. Teams are creating their own elements—methods and practices—in order to fulfill this purpose. Such elements are intended to provide guidance to processes and objects to be used on the methods [1], [6], [7], so, in this way, teams can produce high quality software systems. However, some circumstances when running the software engineering endeavor—e.g., tight deadlines, poor cost estimation, quality demands, volatile requirements, etc.—lead teams to entirely misuse their original methods and practices. They are often forced to tailor their own methods and practices and learn new ways of working [8], so new knowledge and experience gained is abandoned. Consequently, knowledge transference among teams is getting harder.

SEMAT is an initiative aimed to meet the software engineering challenges we face nowadays. As a way to reach this goal, the SEMAT community is promoting a scalable, actionable standard—called the Essence—based on proven principles and best practices [1], [6], [7]. Such a standard provides support to make the software engineering method and practice transference easier, tailoring, measuring, and comparison.

The Essence standard [6], [19] includes a set of elements and a structured language—known as the Essence kernel and language for software engineering methods. Elements contained in the Essence kernel are intended to be constructs for covering all software engineering endeavors [6], [7]: alphas (attributes for assessing the health and progress of the software engineering endeavor, by using states and checklists); activity spaces (groups of activities always present in any software





engineering endeavor); and competencies (what is needed for performing the work, including abilities and knowledge) [6]. Such constructs are grouped into three areas of concern: customer (related to the opportunity and the stakeholder), solution (a technical area including requirements and the software system itself), and endeavor (related to the work, the team, and the way of working) [6].

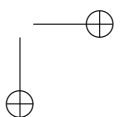
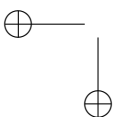
The Essence standard has inspired work on some areas like teaching [20], software startups [21], the anatomy of software requirements [22], and adaptive software engineering [23].

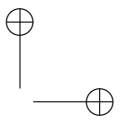
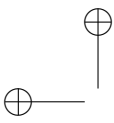
3. Background

Cabré [10] establishes two degrees for the adequacy of a theory: observational, for describing the observed data, and descriptive, for describing the non-observed data. Theories with the two degrees are predictive. The lack of uniformity prevents a theory from achieving the degrees of adequacy. Goosen [11] argues that uniformity is yet to be reached in the nursing terminology, so comparisons are difficult to achieve about data over time and documents coming from different sources.

According to Nedobity [9], concepts and conceptual systems are representations of reality and elaborations of the world. Thus, teams have created specialized terminologies and conceptual systems allowing for communicating among themselves. Such terminologies are composed of concepts representing objects of the world—concepts represent physical objects, as well as properties and relations of those objects. Terminology differences associated to a concept are the result of the diversity of languages. Nedobity [9] believes that deficient terminologies endanger the information flow among people and machine-to-machine communication. Similarly, several designations for the same object are results of the alternative usages of an object [10]. However, Cabré, citing Wüster, states that scientists and technicians should have a characterized and unambiguous terminology [10]. She claims ambiguity from technical languages can be removed by unifying terminology, so in this way scientists and technicians can establish an effective communication.

Terminology problems are common to different domains. Goosen [11] reports difficulties for mapping concepts between nursing terminologies and classifications, even though some international standards are defined for such a discipline. Goosen [11] shows that cross-mapping is still possible, but lack of uniformity can be demonstrated in this domain. Slisko and Dijkstra [12] reveal the lack of a well-defined scientific language waiting to be used in research and teaching; they exemplify the problems with some terms related to science, which arise from the misconception and usage of terms in science as a need for improving teaching with a uniform, defined terminology. Dryden [13] summarizes all the effort devoted to standardizing terminology related to the archive domain and the main difficulties linked to this task: different languages, technological change, and the recent emergence of this discipline as a professional field. Sauberer *et al.* [14] claim that terminology should be self-explanatory in engineering environments, since time for discussions about the meaning of the terms can delay the work to-be-done; they suggest the development and implementation of a corporate terminology policy and they exemplify them in the context of the automotive industry. However, such policies are difficult to spread among several companies, thus causing lack of uniformity in the terms used in the whole environment. Finally, Misra [15] shows that the problems related to the usage of terms in requirements specification lead to misunders-





tanding of such specification along the software development lifecycle; he advocates for a careful review of specifications in order to generate a term-alias glossary for document interpretation. Even though this is a kind of terminology unification, we need to select a unique term for representing the concepts instead of dealing with all the possible aliases of a term.

Sonneveld and Loening [24] assert that new terms are constantly being created to express new ways of working. Such assertion makes sense in the software engineering discipline too. New methods, practices, and thinking frameworks are constantly created, and they commonly result from transformations made to existing methods, practices, and thinking frameworks. Such ways of working bring up the creation of new terms in the software engineering discipline. However, the theory fails to provide an unambiguous standard where the minimal parts forming either a method or a practice are terminologically uniform. Consequently, the theory is unsupportive of new concepts, i.e., we can say—according to Cabré [10]— that the Essence standard is descriptively and predictively inadequate. Elkin [25] says that the relationship between concepts should be uniform across parallel domains within the terminology. We look for such uniformity for the Essence standard in the next Section by using terminology unification.

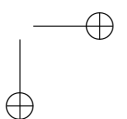
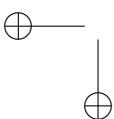
4. Solution

As we previously mentioned, problems related to the uniformity of terminology should be solved, so software engineering teams can use the same terminology for improving their technical communication. In this Section, we propose an improvement to the Essence standard by solving such problems. We apply a four-stage method described in the following sub-sections.

4.1. Selection of base models and definitions

Ward [26] develops a method for addressing terminology problems. The first three stages of the method are devoted to developing a taxonomy and a glossary to be used for detecting terminology problems in the fourth stage. Similarly, Goosen [11] employs the ISO reference terminology model for nursing diagnosis and some definitions coming from different standards. Consequently, we select some base models and definitions for applying the remainder of the method. Since the Essence standard [6] has structured models for alphas and activity spaces, we select such models (see Figs. 1 and 2) as the basis for our analysis. We also use the terms and definitions included in the fourth section of the Essence standard [6]. Some checklists of the alpha states are also reviewed [6].

A third model is selected in order to include expert judgement in the analysis. Morales-Trujillo *et al.* [27] reported a terminological analysis made to the Essence standard by using a pre-conceptual schema (see Fig. 3). In this figure, the terms of the Essence standard are colored in blue and yellow. Since the pre-conceptual schema was validated by some of the Essence standard authors, we can use it as a pivot for evaluating some of the terms used throughout the models, definitions, and checklists of the Essence standard.



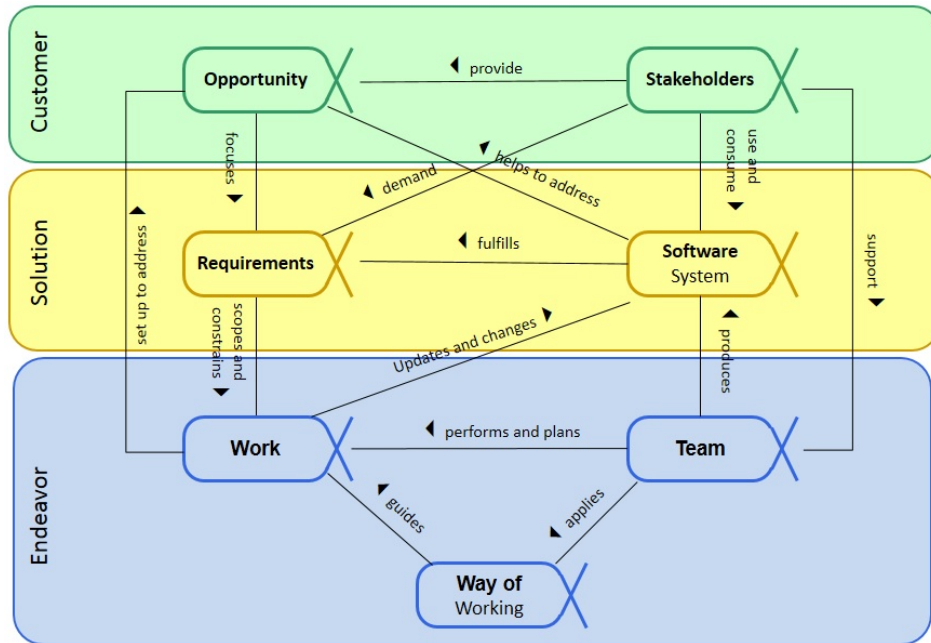


Figure 1. Alphas of the Essence standard and their relationships [6]

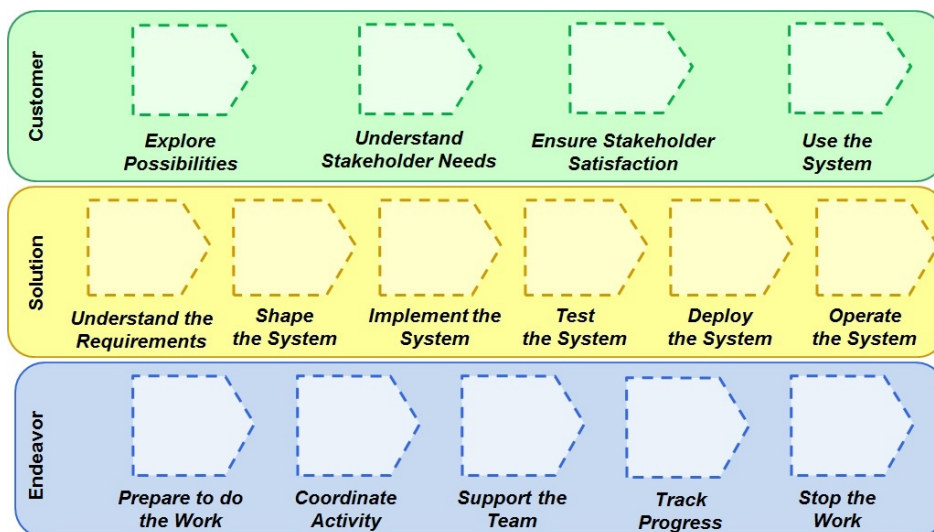


Figure 2. Activity spaces of the Essence standard [6]

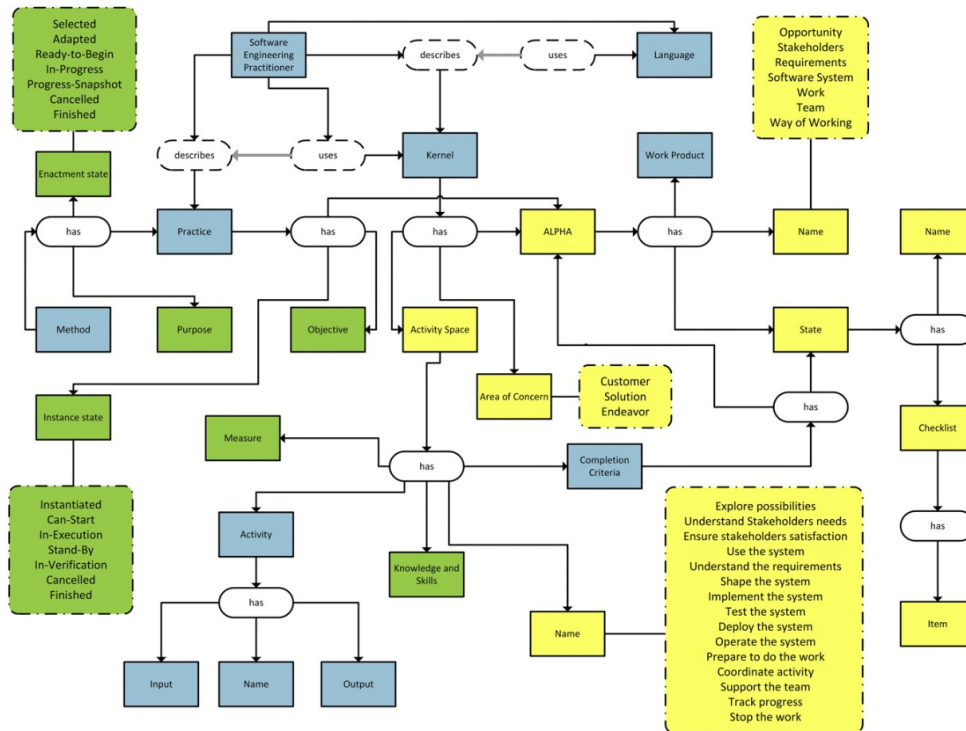


Figure 3. Pre-conceptual schema of the Essence standard [27]

4.2. Identification of terminology problems

We review the selected definitions, checklists, and models in order to establish the usage of terms in the Essence standard. Initially, a specific sample of terms and definitions from the Essence standard is presented in Table I.

Table I. Sample of identified terms and definitions from the Essence standard [6]

Term	Definition
Activity space	A placeholder for something to be done in the software engineering endeavor. A placeholder may consist of zero to many activities.
Opportunity	The set of circumstances that make it appropriate to develop or change a software system.
Work item	A piece of work that should be done to complete the work. It has a concrete result and it leads to either a state change or a confirmation of the current state. A work item may or may not have any related activity.

Along the Essence standard, *activity space* is defined as “descriptions of the challenges a team faces when developing, maintaining, and supporting software systems” [6, p. 15]. However, such a description is excluded from the *activity space* definition. This lack of uniformity can be found

in many of the Essence standard terms and definitions. Relationships of the *opportunity* alpha are excluded from the definition. The term *opportunity* should contain alpha relationships associated to the *opportunity* alpha for providing a better understanding of its definition. Finally, the Essence standard [6] exhibits a deeper definition of the *work item* by means of the alternative usages of this kind of element—*e.g.*, elements in which the work is broken down, elements with clear definitions of done, user stories from a sprint backlog. When the definition of *work item* is compared to the *work product* definition—“an artifact of value and relevance for a software engineering endeavor; a document or a piece of software” [6, p. 92]—we realize that *work item* and *work product* are the same term. *Work product* is defined as an element representing “concrete things to work with, providing evidence for the states an alpha is in” [6, p. 69]. Furthermore, a deeper definition of *work product* can be inferred from the alternative usages of this kind of element—*e.g.*, document where the user requirements are documented, use cases, product backlog or sprint backlog. Therefore, the term *work item* should be renamed as *work product*. Also, we need a definition of *completion criteria* (see Fig. 3), since the definition of *work item* includes the phrase “complete the work” [6, p. 7].

Another source of terminology problems can be related to constructs of the Essence standard like the *alpha state checklists*. Lack of uniformity can be found in several *alpha state checklists*; the *value established* state of the *opportunity* alpha, *seeded* state of the *team* alpha, and *bounded* state of the *requirements* alpha are shown in Table II. The *value established* state of the *opportunity* alpha is defined as “the value of a successful solution has been established” [6, p. 27], but *solution* is an area of concern and the closest construct for *solution* in this context is the *software system* alpha. In fact, *solution* and *software system* seem to be interchangeable in the context of the *alpha state checklist* in Table II when the *value established* state is detailed. The same problems can be detected in the other *alpha state checklists* included in Table II with terms like *mission*, *mechanisms*, *commitment*, *governance rules*, *leadership model*, *success*, *prioritization*, and *assumptions*. Some mentions of other constructs are unclear. For example, *leadership* is a competency of the *endeavor* area of concern with some levels, so probably the expression *leadership model is selected* is intended to be interpreted as *leadership level is determined*. The *requirements* alpha is another example of the misuse of the terminology. The checklist item *the way the requirements will be described is agreed upon* is related to a requirements state, but *described* is outside the set of the requirement states—*i.e.*, *conceived*, *bounded*, *coherent*, *acceptable*, *addressed*, and *fulfilled*.

The aforementioned terminology problems could generate mistakes in the way we assess the progress of the team by using the Essence standard. So, at some point, the team could think they are in an advanced state of a certain alpha when they should be in a previous one. Such mistakes can lead the team to a work bottleneck as the software engineering endeavor time goes on. Terminology problems generated in the *alpha checklists* can lead to completeness problems affecting the uniformity of the theory.

Regarding the models selected in the previous stage, terminology problems can also arise from the relationships among *alphas* shown in Fig. 1 and *alpha descriptions* provided by the Essence standard [6]. We identify *alpha relationships* with terminology problems in Table III. The relationship between the alphas *opportunity* and *requirements* exhibits terminology problems with the alpha description provided in the Essence standard [6]. *Opportunity* is “the set of circumstances that makes it appropriate to develop or change a software system” [6, p. 5] and also “the opportunity

Table II. Full Checklists for the *value established*, *seeded*, and *bounded* states of the Essence kernel [6]

State	Checklist
Value established	The value of addressing the opportunity has been quantified either in absolute terms or in returns or savings per time period (e.g., per annum).
	The impact of the solution on the stakeholders is understood.
	The value that the software system offers to the stakeholders that fund and use the software system is understood.
	The success criteria by which the deployment of the software system is to be judged are clear. The desired outcomes required of the solution are clear and quantified.
Seeded	The team mission has been defined in terms of the opportunities and outcomes.
	Constraints on the team's operation are known.
	Mechanisms to grow the team are in place.
	The composition of the team is defined.
	Any constraints on where and how the work is carried out are defined.
	The team's responsibilities are outlined.
	The level of team commitment is clear.
	Required competencies are identified. The team size is determined.
Governance rules are defined.	
Bounded	Leadership model is selected.
	The stakeholders involved in developing the new system are identified.
	The stakeholders agree on the purpose of the new system.
	It is clear what success is for the new system.
	The stakeholders have a shared understanding of the extent of the proposed solution.
	The way the requirements will be described is agreed upon.
	The mechanisms for managing the requirements are in place.
The prioritization scheme is clear.	
Constraints are identified and considered.	
Assumptions are clearly stated.	

articulates the reason for the creation of the new, or changed, software system (. . .) It represents the team's shared understanding of the stakeholders' needs, and helps shape the requirements for the new software system by providing justification for its development" [6, p. 17]. As a matter of fact, the description of the actual relationship between the alphas *opportunity* and *requirements*—*i.e.*, *focuses*—is excluded from the description of the alpha, and other relationships are excluded from Table III—*i.e.*, *shape*. Terminology problems arising from the relationship among *alphas* and *alpha descriptions* are represented by the existing and excluded relationships, thus leading to a completeness problem—*e.g.*, the description of opportunity makes it clear that the relationship *opportunity makes appropriate creates, updates, or changes software system* was omitted by the authors of the Essence standard [6].

The Essence standard should provide a detailed description of the challenges faced by a team when running *activity spaces* of a software engineering endeavor. However, if such elements exhibit problems, the team is unable to address those challenges in a proper way. In fact, the usage of several designations for the same object or action can be mistaken by teams and produce undesired results. Moreover, terminology problems lead to misunderstanding the completeness of the theory, but we can realize that the theory is incomplete—so the completeness problem should be solved—by addressing terminology problems. We can identify activity spaces with terminology

problems in Table IV.

Table III. Alpha relationships with identified terminology problems [6]

Alpha	Alpha	Relationship
Opportunity	Requirements	Focuses
Work	Software System	Updates and changes
Team	Way of Working	Applies
Way of Working	Work	Guides
Team	Software System	Produces

Table IV. Activity spaces with identified terminology problems [6]

Name	Area of concern
Explore possibilities	Customer
Understand Stakeholder Needs	Customer
Use the System	Customer
Shape the System	Solution
Implement the System	Solution
Test the System	Solution
Deploy the System	Solution
Operate the System	Solution
Coordinate Activity	Endeavor
Support the team	Endeavor
Track Progress	Endeavor

The phrase *explore possibilities* comprises a verb and a noun. In order to provide an accurate name for the *activity space*, the noun should be included in the specialized terminology defined by the Essence standard [6], as expressed in the pre-conceptual schema of Fig. 3, and *possibility* is outside such terminology. Something similar occurs to *system*. Be advised that system was considered a name for the software system alpha, but it was rejected because it “was considered to be too general” and “the consensus was that all engineering disciplines produce some kind of system, and therefore software engineering needs to produce something more specialized than just a system” [19, p 11]. In this way, the activity spaces related to the software system should be named after the name of the alpha. The same applies for *understand stakeholder needs*. *Need* (absent from Fig. 3) was also considered a name for an alpha—in this case the requirements alpha included in the Essence standard—but it was rejected because it was “considered too confusing when compared and contrasted with requirements” [8, p 19].

Terminology problems associated with *coordinate activity*, *support the team*, and *track progress* are related to *activity space* descriptions. The description of *coordinate activity* is to “co-ordinate and direct the team’s work,” and “this includes all ongoing planning and re-planning of the work,

and adding any additional resources needed to complete the formation of the team” [6, p 19], the description of *support the team* is to “help the team members to help themselves, collaborate, and improve their way of working” [6, p 20]; and *track progress* is to “measure and assess the progress made by the team” [6, p 20]. Accordingly, the *activity space* names should be re-defined in a way to be consistent with the actual description of them.

4.3. Unification of terms

Terminology unification is first applied to the definitions in Table I. We need to add information and make uniform use of terms, as we propose in Table V. Regarding the definition of *activity space* and the *opportunity* definition, we need to add some information for making uniform usage of the terms in the standard. Also, as we stated before, *work product* and *work item* seem to be the same construct according to their definitions, so we propose to create just one single definition and use the term *work product* throughout the Essence standard. We also propose to add a definition to the completion criteria, since this is a term used several times in the standard.

Table V. Sample of Essence standard terms and definitions with terminology problem resolution

Term	Definition	Proposal
Activity space	A placeholder for something to be done in the software engineering endeavor.	A placeholder for activities to be done in the software engineering endeavor.
	A placeholder may consist of zero to many activities.	A placeholder may consist of zero to many activities.
Opportunity	The set of circumstances that makes it appropriate to develop or change a software system.	The set of circumstances that makes it appropriate to create, update, or change a software system.
Work product	(Work item in the standard) A piece of work that should be done to complete the work. It has a concrete result and it leads to either a state change or a confirmation of the current state. Work item may or may not have any re- lated activity.	Concrete artifacts that should be done to complete the work, providing evidence for the states an alpha is in. A work product is the result of a related activity.
	(Work product implicit in the standard) Concrete things to work with, providing evidence for the states an alpha is in.	
	An artifact of value and relevance for a software engineering endeavor; a document or a piece of software	
Completion criteria	(Missing in the standard)	Definition of the conditions for an activity space to be considered complete. It is expressed in terms of alpha states.

Terminology problems in the *alpha checklists* are solved by changing non-standard terms, excluding redundant information, and including some missing information in the checklist items (see Table VI).

Table VI. Proposed checklists for the value established, seeded, and bounded states of the Essence kernel

State	Checklist
Value established	The value of addressing the opportunity has been quantified either in absolute terms or in returns or savings per time period (<i>e.g.</i> , per annum). <i>The stakeholders are satisfied in use.</i>
	The value that the software system offers to the stakeholders that fund and use the software system is understood. <i>The completion criteria to deploy the software system are clear.</i> <i>The work products required of the operational software system are clear.</i>
Seeded	The team mission has been defined in terms of the opportunities and <i>work products.</i> Constraints on the team's <i>way of working</i> are known. Mechanisms to <i>form</i> the team are defined. The <i>form</i> of the team is defined. Any constraints on where and how the work is under control are defined. <i>Management and leadership of the team are clear.</i> <i>Required competency levels are identified.</i>
	The stakeholders <i>to be satisfied in use with the software system</i> are <i>recognized.</i> The stakeholders agree on the purpose of the software system. <i>The completion criteria to develop the software system are clear.</i> The stakeholders <i>are in agreement about the value that the software system offers.</i> The way the requirements <i>will be bounded</i> is agreed upon. <i>Management of the requirements is clear.</i>

Some of the terms we are proposing to change (and by which ones) are: new system (software system), solution (software system), success criteria (completion criteria), operation (way of working), grow (form), composition (form), impact on the solution is understood (satisfied in use), identified (recognized), shared understanding (in agreement), extent (value), and described (bounded). Some of the changes obey to definitions of the Essence standard constructs; for example, we change the term *impact on the solution is understood* because no states are named in this way. However, we have a clear definition of the *satisfied in use* state of stakeholders. Something similar happens to the term *described*, which is related to requirements; the next state to such a description is the *bounded* state.

The redundant information we propose to exclude is the following:

- ***The impact of the solution on the stakeholders is understood*** is a description included in the definition of the *satisfied in use* state of stakeholders.
- ***Team responsibilities are outlined, the level of team commitment is clear, the team size is determined, governance rules are defined, and leadership model is selected*** are checklist items related to our proposal: ***management and leadership of the team are clear.*** In this case, we are using two competencies of the endeavor area of concern for covering all redundant topics.
- ***The mechanisms for managing the requirements are in place, the prioritization scheme is clear, constraints are identified and considered, and assumptions are clearly stated*** are

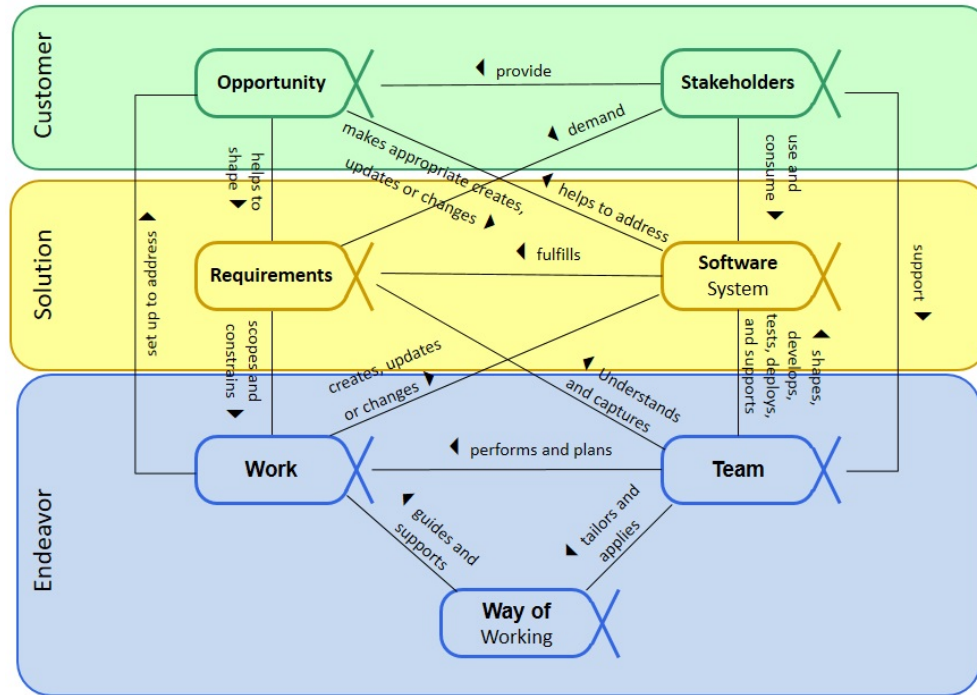


Figure 4. Proposal for solving terminology problems in the alpha relationships

checklist items related to our proposal: *management of the requirements is clear*.

The missing information we are including is the following: the work products related to the solution are those related to the *software system* in the *operational* state; we always know the *required competencies*, since the Essence standard only recognizes six of them, but what we need to identify is the *competency level* required by the team members.

We propose a solution to terminology problems of the alpha relationships in Fig. 4. Also, the details of the alpha relationships are summarized in Table VII. Most of the changes are proposed after reviewing the activity spaces defined in the Essence standard. For example, *produces* is very short for describing how the team is related to the software system, since we have five activity spaces related to software system in the *solution* area of concern: *shape*, *develop*, *test*, *deploy*, and *support*. Some other changes are related to the definitions included in the Essence standard. For example, *way of working* is defined as “the tailored set of practices and tools used by a team to guide and support their work” [6, p. 57], so the team *tailors* and *applies* the way of working, and the way of working *guides* and *supports* the work. Some other relationships from Fig. 1 are omitted, but we can recover them by reviewing some other constructs of the Essence standard. For example, we find that the team *captures* and *understands* the requirements in the definition of the *analysis* competency.

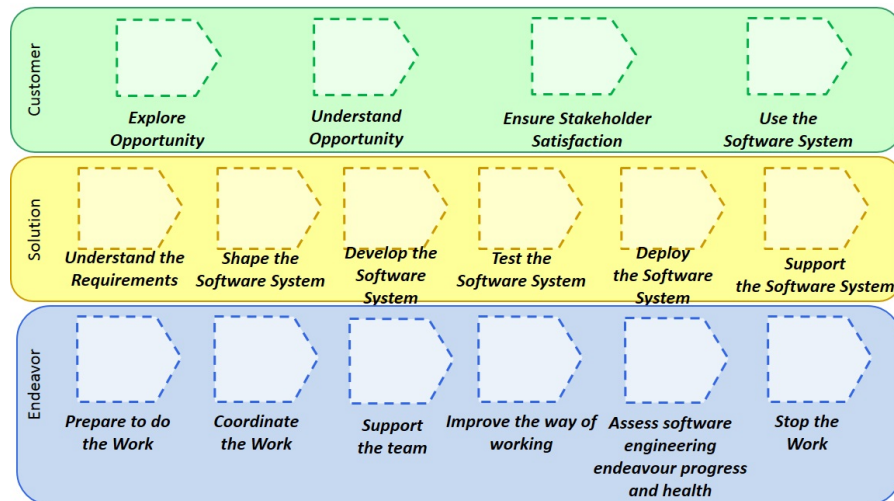


Figure 5. Proposal of names for activity spaces in order to solve terminology problems

We propose a solution for terminology problems of the activity spaces in Fig. 5 and Table VIII. As we said before, activity spaces represent the placeholders for activities to be done in a software engineering endeavor, *i.e.*, what the team should perform to produce a software system. Thus, changes made to activity spaces should be reflected in the elements related to the alphas. Some of the changes we propose for activity spaces are related to the names of the alphas involved. We discussed in Section 4.2 how the name *system* has been rejected and the name *software system* was adopted. However, the older name is still applied in five out of six activity spaces belonging to the *solution* area of concern. This assertion is ratified by the experts by including *software system* as an alpha in Fig. 3. For this reason, we propose changing *shape the system* for *shape the software system*. In the same way, we propose changing *possibilities* and *stakeholder needs* for the adequate alpha name (see Figs. 1 and 3): *opportunity*. Some other changes are related to the definitions included in the Essence standard. For example, the *team* alpha is defined as “the group of people actively engaged in the development, maintenance, delivery, or support of a specific software system” [6, p. 6]; in this way, we propose changing the verb *implement* for *develop* and the verb *operate* for *support*. Finally, we propose changing *coordinate activity* for *coordinate the work*, since *activity* is not considered an alpha and the next name related to it as alpha is *work*.

Solving terminology problems within the Essence standard implies that it is incomplete. When we solve such problems, some terms are still outside of the terminology provided by the Essence standard. This leads to the definition of new elements and terms. Some evidence about such definition is the *support the team* activity space. When we solve the terminology problems we need a new activity space named *improve the way of working* (see Fig. 5), which is used to describe activities related to the way of *working* alpha for promoting the advance in the way of *working* states. Given the above, the activity space *completion criteria* (see the proposed definition in Table V) are compromised—the completion criteria include the *collaborating* state of the *team* alpha and *in place* state of the *way of working* alpha—since the description is outside the work to be done

Table VII. Proposed names for the relationship between alphas

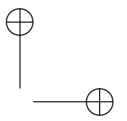
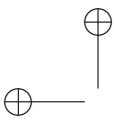
Alpha	Alpha	Relationship	Proposal
Opportunity	Requirements	Focuses	Helps to shape
Work	Software System	Updates and changes	Creates, updates, or changes
Team	Way of working	Applies	Tailors and applies
Way of working	Work	Guides	Guides and supports
Team	Software System	Produces	Shapes, develops, tests, deploys, and supports
Opportunity	Software System		Makes appropriate creates, updates, or changes
Team	Requirements		Understands and captures

Table VIII. Sample of Essence standard terms and definitions with consistency and terminological problems resolution

Name	Area of concern	Proposal
Explore possibilities	Customer	Explore Opportunity
Understand stakeholder needs	Customer	Understand opportunity
Use the system	Customer	Use the software system
Shape the system	Solution	Shape the software system
Implement the system	Solution	Develop the software system
Test the system	Solution	Test the software system
Deploy the system	Solution	Deploy the software system
Operate the system	Solution	Support the software system
Coordinate activity	Endeavor	Coordinate the work
<None>	Endeavor	Improve the way of working
Track progress	Endeavor	Assess software engineering endeavor progress and health

for achieving the checklists associated to the collaborating state of the team alpha. Based on such facts, we propose the redefinition of the *support the team* and *improve the way of working* activity spaces as follows:

- *Support the team*
 - Description: Support the team to make it work as a cohesive unit, make the communication open and honest, inform each other and focus on achieving the team mission [6].
 - Input: Team.
 - Entry criteria: Team::Formed.
 - Completion criteria: Team::Collaborating.
- *Improve the way of working*



- Description: “Help the team members to help themselves, collaborate, and improve their way of working” [6, p. 20].
- Input: Way of Working.
- Entry criteria: Team::Formed, Way of Working::Foundation Established.
- Completion criteria: Way of Working::In place.

4.4. Measurement of the gap between the current standard terms and the proposed changes

Misra [15] proposes a combination of a latent semantic analysis and a dissimilarity degree between two-word chains as a final stage of the terminological inconsistency analysis of natural language requirements. Similarly, Dalpiaz *et al.* [28] propose semantic similarity as a measure of the relatedness of two terms when analyzing terminological problems in a specification. Consequently, we include this fourth stage in our method and select the lexical semantic relatedness [29] for evaluating changes in terms and the Levenshtein distance for evaluating changes in word chains as a way to measure the proposed changes and their impact in the Essence standard.

We calculate the distance between the original and the proposed terms by using lexical semantic relatedness [29], a measure of how two words are related in meaning. To this effect, we use the online calculator included in www.olesk.com and summarize the results in Table IX. Even though some of the meanings are close (more than 90 %), we can see from Table IX we are improving the accuracy in the terminology by using the right words.

As Misra [15] suggests, we use the Levenshtein distance for evaluating the smaller number of insertion, deletion, and substitution operations required to change one word chain to the other. We also compare the dissimilarity as a percentage of the longer word chain, as we summarized in Table X. We calculate the Levenshtein distance by using the calculator included in https://es.planetcalc.com/1721/?language_select=es. As you can see from Table X, lower numbers of dissimilarity are associated with shorter distance between word chains. The usage of the same word chains is zero, the lowest number of dissimilarity. Again, we are improving the accuracy of the Essence standard terminology by adding uniform information into some constructs of the standard.

Due to the space requirements of this paper, we exemplify the terminology problems the Essence standard exhibits in the current version. Be advised that we have selected some of the constructs included in the standard and just a small number of each construct. For example, the standard has 27 reported definitions, and we work with just three of them. We work with three out of 41 states reported in the standard. The coverage is bigger in the case of the alphas and the activity spaces, but we demonstrated that terminology problems are linked to many constructs of the Essence standard. Fortunately, as we propose in this paper, the solutions to such problems can be easily achieved and they can drive improvements in accuracy, as we show with the lexical semantic relatedness and dissimilarity we calculate. For this reason, we strongly believe the guidelines we propose in this paper could help to solve the problems in question.

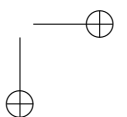
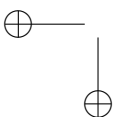
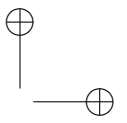
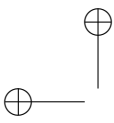


Table IX. Summary of lexical semantic relatedness

Original term	Proposed term	Lexical semantic relatedness (%)
Item	Product	75
System	Software system	92
Solution	Software system	33
Success	Completion	50
Operation	Way of working	82
Grow	Form	91
Composition	Form	90
Understood	Satisfied in use	41
Identified	Recognized	87
Shared understanding	In agreement	41
Extent	Value	91
Described	Bounded	33
Focuses	Help to shape	56
Possibility	Opportunity	92
Stakeholder need	Opportunity	49
Implement	Develop	45
Operate	Support	56
Activity	Work	92

Table X. Summary of lexical semantic relatedness

Original word chain	Proposed word chain	Levenshtein distance	Dissimilarity (%)
Updates and changes	Creates, updates, or changes	10	36
A placeholder for something to be done in the software engineering endeavor	A placeholder of the essential things to do in the software engineering endeavor	20	25
The set of circumstances that makes it appropriate to develop or change a software system	The set of circumstances that makes appropriate to create, update, or change a software system	16	17
Concrete things to work with, providing evidence for the states an alpha is in	Concrete things that should be done to complete the work, providing evidence for the states an alpha is in	34	32
Applies	Tailors and applies	13	68
Guides	Guides and supports	13	68
Produces	Shapes, develops, tests, deploys, and supports	42	91



5. Conclusions and future work

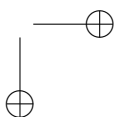
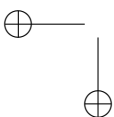
In this paper we proposed the solution to some terminology problems in the Essence standard. We used a method based on terminology unification in order to intervene constructs like definitions, alpha state checklist items, relationships between alphas, and activity spaces. We identified main problems such as the use of non-standard terms for naming standard elements, the addition of redundant information, and the lack of pertinent information related to some constructs. After solving the aforementioned problems, we evaluated the accuracy of our solution with two metrics related to semantic and morphological distance. Even though we sampled the problems with some constructs, we believe the presented guidelines could help to solve other problems in the Essence standard. Also, as a result of such problem resolutions, we proposed two new alpha relationships excluded from the Essence standard, one term definition, and one new activity space. We redefined three terms, three alpha state checklists, five alpha relationships, and 11 activity spaces. Such problem resolution provides a better understanding of the Essence standard. Consequently, software engineering practitioners could have a specialized terminology that allows unambiguous communication with each other. Also, we contribute to reducing the gaps between the real progress of the team and the progress assessed by using the terminology defined in the Essence standard.

As future work, we can define the following lines of work:

- Developing a focus group in order to validate the proposed changes with practitioners and experts of the software engineering field of knowledge.
- Applying the solution to the rest of the constructs defined in the Essence standard.
- Completing the terms defined in the Essence standard by following the guidelines defined in this paper. We believe we should have more than the 27 current definitions of the Essence standard. Some constructs such as competency level, milestone, phase, etc. are still missing in the standard.
- Detecting other problems arising from terminology of the Essence standard. We can suppose we can discover more additions and deletions for the standard while reviewing the rest of the constructs.
- Applying the method followed in this paper to other bodies of knowledge and standards related to software engineering—e.g., the Software Engineering Body of Knowledge SWE-BoK—and other disciplines like the Project Management Body of Knowledge PMBoK.

References

- [1] I. Jacobson, “Discover the Essence of Software Engineering,” *CSI Communications*, vol. 35, no. 4, pp. 9-11, 2011. [↑214, 215](#)
- [2] V. Gaoroussi, A. Coskuncay, A. Betin-Can, and O. Demirörs, “A survey of software engineering practices in Turkey,” *J. Sys. Soft.*, vol. 108, pp. 148-177, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2015.06.036> [↑214, 215](#)
- [3] C. Riemenschneider, B. Hardgrave, and F. Davis, “Explaining Software Developer Acceptance of Methodologies: A Comparison of Five Theoretical Models,” *IEEE Trans. Soft. Eng.*, vol. 28, no. 12, pp. 1135-1145, 2002. <https://doi.org/10.1109/TSE.2002.1158287> [↑214, 215](#)



- [4] A. Arora and S. Athreye, "The software industry and India's economic development," *Inf. Econ. Pol.*, vol. 14, no. 2, pp. 253-273, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0167-6245\(01\)00069-5](https://doi.org/10.1016/S0167-6245(01)00069-5) ↑214, 215
- [5] J. Verner, M. Babar, N. Cerpa, T. Hall, and S. Beecham, "Factors that motivate software engineering teams: A four country empirical study," *J. Sys. Soft.*, vol. 92, pp. 115-127, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2014.01.008> ↑214, 215
- [6] Object Management Group "Kernel and Language for Software Engineering Methods (Essence) version 1.2", 2018. [Online] Available: <http://www.omg.org/spec/Essence/> ↑214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 225, 226, 227, 228
- [7] I. Jacobson, P.-W. Ng, P. McMahon, I. Spence, and S. Lidman, *The Essence of Software Engineering. Applying the SEMAT Kernel*. Crawfordsville, IN, USA, Addison-Wesley Professional, 2013. ↑214, 215
- [8] L. Singer and K. Schneider, "Influencing the Adoption of Software Engineering Methods Using Social Software," in *Int. Conf. Soft. Eng. (ICSE)*, 2012, pp. 1325-1328. <https://doi.org/10.1109/ICSE.2012.6227088> ↑214, 215, 222
- [9] W. Nedobity, "The General Theory of Terminology: A Basis for the Preparation of Classified Defining Dictionaries," *J. Dict. Soc. North America*, vol. 5, pp. 69-75, 1983. <https://doi.org/10.1353/dic.1983.0000> ↑214, 216
- [10] M. T. Cabré, "Theories of terminology, Terminology," *Int. J. Theor. App. Iss. Spec. Comm.*, vol. 9, no. 2, pp. 163-199, 2003. <https://doi.org/10.1075/term.9.2.03cab> ↑214, 215, 216, 217
- [11] W. Goosen, "Cross-mapping between three terminologies with the international standard nursing reference terminology model," *Int. J. Nurs. Term. Class.*, vol. 17, no. 4, pp. 153-164, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1744-618X.2006.00034.x> ↑214, 215, 216, 217
- [12] J. Slisko and D. Dijkstra, "The role of scientific terminology in research and teaching: is something important missing?," *J. Res. Sci. Teach.*, vol. 34, no. 6, pp. 655-660, 1997. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(199708\)34:6<655::AID-TEA7>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199708)34:6<655::AID-TEA7>3.0.CO;2-M) ↑215, 216
- [13] J. Dryden, "A tower of Babel: standardizing archival terminology," *Archival Sci.*, vol. 5, pp. 1-16, 2006. <https://doi.org/10.1007/BF02510902> ↑215, 216
- [14] G. Sauberer, B. Nájera, J. Dreßler, K. Schmitz, P. Clarke, and R. O'Connor, "Do we speak the same language? Terminology strategies for (software) engineering environments based on the Elcat model—innovative terminology e-learning for the automotive industry," *EuroSPI 2017, CCIS*, vol. 748, pp. 653-666, Ostrava, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64218-5_54 ↑215, 216
- [15] J. Misra, "Terminological inconsistency analysis of natural language requirements," *Inf. Soft. Tech.*, vol. 74, pp. 183-193, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2015.11.006> ↑215, 216, 228
- [16] M. Varulenko and K. Meijnyk, "Term properties and modern terminological systems development," *Int. Ins. Term. Res. IITF J.*, vol. 24, pp. 29-38, 2013-2014. ↑215
- [17] C. Zapata, R. Arango, and L. Jiménez, "Mejoramiento de la consistencia entre la sintaxis textual y gráfica del lenguaje de SEMAT," *Polibits*, vol. 49, pp. 83-89, 2014. <https://doi.org/10.17562/PB-49-10> ↑215
- [18] R. Arango, "Especificación en OCL de los elementos del Núcleo de SEMAT", MSc. Thesis, Departamento de Ciencias de la computación y la decisión, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2016. ↑215
- [19] Object Management Group, "Essence—Kernel and Language for Software Engineering Methods. Revised Submission", 2013. [Online] Available: <http://www.omg.org/cgi-bin/doc?ad/2013-02-01> ↑215, 222
- [20] I. Jacobson, H. Lawson, P. Ng, P. McMahon, and M. Goedicke. *The essentials of modern software engineering: free the practices from the method prisons!*. Milton Keynes, UK, ACM Books, Morgan & Claypool Publishers, 2019. <https://doi.org/10.1145/3277669.3277673> ↑216
- [21] K. Kemell, A. Nguyen-Duc, X. Wang, J. Risku, and P. Abrahamsson, "Software Startup ESSENCE: How Should Software Startups Work?," In *Fundamentals of Software Startups* A. Nguyen-Duc, J. Münch, R. Prikladnicki, X. Wang, and P. Abrahamsson, Cham, Ger., Springer, 2020, pp. 97-109. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35983-6_6 ↑216
- [22] B. Meyer, J. Bruel, S. Ebersold, F. Galinier, and A. Naumchev, "Towards an Anatomy of Software Requirements," *Lect. Notes Comp. Sci.*, vol. 11771, pp. 10-40, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29852-4_2 ↑216
- [23] J. Park, J. Jang, and E. Lee, "Theoretical and empirical studies on essence-based adaptive software engineering," *Inf. Tech. Man.*, vol. 19, pp. 37-49, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10799-016-0273-5> ↑216
- [24] W. Sonneveld and K. Loening, "A terminologist's and a chemist's look at chemical neologisms," *Stand. Tech. Term.: Prin. Prac.*, vol. 2, pp. 23-28, 1988. <https://doi.org/10.1520/STP29546S> ↑217

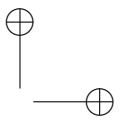
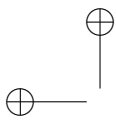
- [25] P. Elkin, "Theoretical foundations of terminology," In *Terminology and terminological systems, health informatics*, London, UK, Springer-Verlag, 2012, pp. 51-70. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2816-8_4 ↑217
- [26] S. Ward, "The hierarchical terminology technique: a method to address terminology inconsistency," *Qual. Quant.*, vol. 46, pp. 71-87, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11135-010-9328-6> ↑217
- [27] M. Morales-Trujillo, H. Oktaba, and M. Piattini, "The making of an OMG standard," *Comp. Stand. Interf.*, vol. 42, pp. 84-94, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2015.05.001> ↑217, 219
- [28] F. Dalpiaz, I. van der Schalk, s. Brinkkemper, F. Aydemir, and G. Lucassen, "Detecting terminological ambiguity in user stories: tool and experimentation," *Inf. Soft. Tech.*, vol. 110, pp. 3-16, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2018.12.007> ↑228
- [29] R. Siblini and L. Kosseim, "Using a weighted semantic network for lexical semantic relatedness," *Proceedings of recent advances in natural language processing*, Hissar, 2013, pp. 7-13. ↑228

Carlos Mario Zapata-Jaramillo

Civil Engineer, Specialist in Information Systems Management, M.Sc. in Engineering, and PhD in Engineering focused on Systems, all degrees from the Universidad Nacional de Colombia at Medellín. Full Professor (Tenured) of the Computing and Decision Sciences Department from Universidad Nacional de Colombia at Medellín. Leader of the Computing Language Research Group. Areas of interest: software engineering, requirements engineering, computational linguistics, and didactic strategies for engineering teaching.
Email: cm zapata@unal.edu.co

Antony Henao-Roque

Systems and Informatics Engineer and MSc. in Systems Engineering, both degrees from Universidad Nacional de Colombia at Medellín; member of the Computing Language Research Group. Areas of interest: software engineering and massive data analysis.
Email: ajhenaor@unal.edu.co



A Metaheuristic Solution for the School Bus Routing Problem with Homogeneous Fleet and Bus Stop Selection

Una solución metaheurística al problema de planificación de rutas de autobuses escolares con flota homogénea y selección de paradas

Ana Camila Pérez Pérez¹, Eduardo Sánchez Ansola¹, Alejandro Rosete¹

¹Universidad Tecnológica de La Habana “José A. Echeverría” (Cuba).

Correspondence e-mail: acperez@ceis.cujae.edu.cu, esancheza@ceis.cujae.edu.cu, rosete@ceis.cujae.edu.cu

Recibido: 23/01/2020. Modificado: 08/09/2020. Aceptado: 08/09/2020.

Abstract

Context: Optimization problems allow representing real-life situations, and, with the right method, a good solution to a problem can be reached. Conceptually, the problem under study is known as the School Bus Routing Problem. This work can be taken as a starting point for the creation of tools for this problem.

Method: In this work, a mathematical model based on the literature was designed and implemented, and it was adapted to be solved using metaheuristics. Three mutation operators and a selection mechanism based on weights were implemented according to the improvements that each of them offered to the solution. To evaluate the results, a statistical comparison was made with another solution in the literature based on the evaluation of 112 instances of the problem.

Results: In the solution of the 112 instances of the problem, the following algorithms were used: the Tabu Search, Hill Climbing variants, Simulated Annealing, and an algorithm portfolio that includes the previous ones. The results showed that the best behavior was obtained by the portfolio, with results comparable to those in the literature. However, as the number of instances grows, the results tend to get worse.

Conclusions: With this research, it was possible to obtain a model that represents the initial problem, as well as two algorithms for finding solutions by means of metaheuristics. According to the results obtained, future work should be directed towards new ways of building the initial solution and the implementation of new assignment operators.

Keywords: metaheuristics, optimization model, school bus routing problem

Language: Spanish

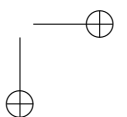
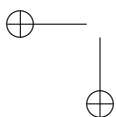
Open access



Cite this paper as: Pérez, A. C., Sánchez, E., Rosete A.: Una solución metaheurística al problema de planificación de rutas de autobuses escolares con flota homogénea y selección de paradas. *INGENIERÍA*, Vol. 26, Num. 2, pp. 233-253 (2021).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

<https://doi.org/10.14483/23448393.15835>



Resumen

Contexto: Los problemas de optimización permiten representar situaciones de la vida real, y con un método apropiado se puede llegar a una buena solución del problema. Conceptualmente, el problema bajo estudio se conoce como problema de planificación de ruta de autobuses escolares. El presente trabajo puede ser tomado como punto de partida para la creación de herramientas para este problema.

Método: En este trabajo se diseñó e implementó un modelo matemático del problema basado en la literatura y se adaptó para su solución usando algoritmos metaheurísticos. Se implementaron tres operadores de mutación y un mecanismo de selección basado en pesos, según las mejoras que brindaba cada uno a la solución. Para evaluar los resultados, se realizó una comparación estadística con otra solución de la literatura a partir de la evaluación de 112 instancias del problema.

Resultados: En la solución de las 112 instancias del problema se utilizaron los siguientes algoritmos: búsqueda tabú, variantes del escalador de colinas, recocido simulado y un portafolio de algoritmos que incluye a los anteriores. Los resultados reflejaron que el mejor comportamiento lo obtuvo el portafolio con resultados comparables a los de la literatura. Sin embargo, a medida que crece el número de instancias, los resultados tienden a empeorar.

Conclusiones: Con esta investigación se obtuvo un modelo que permite representar el problema inicial, así como dos algoritmos para la búsqueda de soluciones utilizando metaheurísticas. Según los resultados obtenidos, los trabajos futuros deben encaminarse hacia nuevas formas de construcción de la solución inicial y la implementación de nuevos operadores de asignación y mutación.

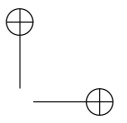
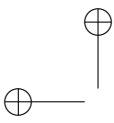
Palabras clave: metaheurísticas, modelo de optimización, problema de planificación de rutas de autobuses escolares

Idioma: Español

1. Introducción

El problema de planificación de rutas de autobuses escolares (conocido como SBRP, por sus siglas en inglés School Bus Routing Problem) tiene su origen en escuelas que cuentan con una flota de autobuses y tienen un conjunto de estudiantes a los cuales se les debe brindar el servicio de transporte, puesto que la distancia entre sus casas y la escuela excede el límite superior que pueden caminar para llegar a la escuela. En el surgimiento de este problema la mayoría de las escuelas tenía que preparar la planificación de las rutas de autobuses manualmente. Esta actividad resulta costosa en cuanto al tiempo que consumía desempeñarla, además de que requería de talento administrativo por parte de la persona encargada de llevar a cabo esta tarea. Lo que traía consigo que la calidad del resultado final de la planificación estuviera directamente relacionada con la experiencia que tuviera el responsable de realizarla [1]. Con el crecimiento de la población, el aumento de la región que cubren las escuelas y por tanto el incremento de la cantidad de estudiantes que deben ser transportados, fue ganando mayor importancia el estudio de SBRP [1].

El SBRP ha sido objeto de estudio de disímiles investigaciones desde [1], la primera publicación que se conoce acerca del tema. El SBRP se considera un tipo de problema del conjunto de los problemas de planificación de rutas de vehículos (conocido como VRP por sus siglas en inglés) [2]. Además, ha sido aplicado en diferentes escenarios. Uno de estos se plasma en [3], en el cual se resuelve el problema de planificación de rutas de autobuses escolares en un área rural en Brasil y se cuenta con una flota con capacidad limitada. En el mismo se busca disminuir el costo y hacer el



recorrido en un tiempo razonable. En [2] se hace un estudio para el desarrollo de un sistema para el servicio de transporte escolar de Hong Kong. El artículo plantea que en este territorio suman más de 600.000 los niños que cursan alguna enseñanza hasta primaria, y la mayoría de ellos utiliza el transporte escolar. En Brasil también, según el estudio realizado por [4], donde se propone una solución para optimizar el transporte de estudiantes usando un modelo SBRP. Para el problema presentado cuentan con 944 estudiantes, 23 escuelas y una red de caminos de toda la ciudad de Brasilia. En [5] se resuelve el problema para una aplicación real en un colegio de Bogotá, Colombia, con 600 estudiantes y 400 nodos localizados en área urbana y rural. En este artículo, se tiene en cuenta las ventanas de tiempo y se utiliza la generación de columnas como método de solución.

El objetivo de SBRP es planificar rutas de autobuses escolares para transportar los estudiantes desde una parada cercana a su casa hasta la escuela, siempre teniendo en cuenta que cada estudiante no debe caminar más que una distancia máxima definida [6].

El presente trabajo se plantea como problema de investigación, ¿cómo resolver el problema de planificación de rutas de autobuses escolares usando algoritmos metaheurísticos? Para dar respuesta al mismo, se propone un modelo que abarca la preparación de los datos, la selección de las paradas de los autobuses y la generación de las rutas de los autobuses. Es un modelo diseñado para problemas de flota homogénea, en el que la capacidad de los autobuses es la misma, se considera una sola escuela como origen y destino final de todos los estudiantes trasladados y no tiene en cuenta la transportación de estudiantes con tratamiento diferenciado. El objetivo del modelo de SBRP propuesto busca minimizar la distancia total recorrida por todos los autobuses, mientras que las restricciones que plantea van dirigidas a garantizar que:

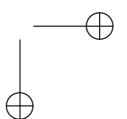
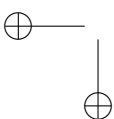
1. Cada parada sea visitada como máximo solo una vez.
2. Cada estudiante pueda alcanzar la parada a la que fue asignado.
3. En cada ruta no se exceda la capacidad del autobús.
4. Cada parada a la que se asigna algún estudiante sea visitada por las rutas de autobuses una y solo una vez.

El valor práctico de este trabajo es la obtención de un modelo y una solución basada en metaheurísticas para el problema de planificación de ruta de autobuses escolares (SBRP). Además, proporciona una base para futuras investigaciones y soluciones que consideren nuevos aspectos de la realidad.

Este trabajo, aparte de presentar el modelo teórico, incluye los detalles de diseño e implementación de una solución metaheurística del mismo, así como un estudio experimental en más de 100 instancias de la literatura. Los resultados obtenidos permiten afirmar que la propuesta es competitiva con el estado del arte en este tema.

2. Problema de planificación de rutas de autobuses escolares

El problema de planificación de rutas de autobuses escolares es un problema clásico de optimización combinatoria [7]. Por su complejidad, se clasifica como NP-duro y es un tipo específico de



los problemas de planificación de rutas de vehículos (VRP, por sus siglas en inglés) [6]. Este grupo tiene como característica que, a pesar de poder ser descrito fácilmente, es muy difícil de resolver. Esto se puede hacer a través de métodos matemáticos exactos, pero no se obtiene la mejor solución en un tiempo polinomial [8].

El SBRP brinda una planificación eficiente de rutas de autobuses escolares, en las que los autobuses deben recoger estudiantes en varias paradas y transportarlos hasta la escuela que cada uno tiene designada. Para las soluciones que brinda el problema, se debe tener en cuenta el cumplimiento de restricciones que pueden ser de capacidad de los autobuses, del tiempo máximo que pueden estar los estudiantes viajando en el autobús o de los períodos de tiempo de las escuelas, entre otras [1], [4].

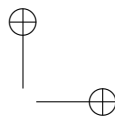
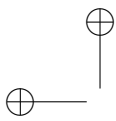
En [9] se define que SBRP se divide en cinco subproblemas: preparación de los datos, selección de las paradas de los autobuses, generación de las rutas de los autobuses, ajuste al horario del timbre escolar y programación de las rutas. Según [9], los dos últimos subproblemas del ajuste al horario del timbre escolar y la programación de las rutas son aplicables en casos en los que se debe tener en cuenta más de una escuela como destino final de los estudiantes.

Preparación de los datos: esta etapa prepara los datos para los procedimientos del resto de los subproblemas. En este subproblema son especificados los siguientes datos: estudiantes, paradas de autobuses, autobuses y matriz de costo de origen- destino (OD). Además, se define la red de caminos por los que pueden transitar los autobuses.

De cada estudiante se tiene la localización de la casa donde vive, la escuela a la que se dirige en problemas con múltiples destinos, y el tipo de estudiante en problemas en los que se tiene en cuenta la transportación de estudiantes de educación especial. De las escuelas se puede tener: localización, horario de entrada y salida de estudiantes y tiempo máximo de recorrido que pueden hacer los estudiantes. De los autobuses se incluye la localización de su origen y el tipo de autobús, además de saber la capacidad de cada uno de ellos para estudiantes generales y para estudiantes de educación especial. La matriz OD almacena el menor costo (tiempo, distancia, etc.) del desplazamiento entre cada par de nodos. En los nodos se incluyen las escuelas, la ubicación de los estudiantes y las paradas.

Selección de las paradas de los autobuses: en esta etapa de un problema de planificación de rutas de autobuses escolares corresponde hacer la selección de cuáles paradas se van a visitar y cómo se van a asignar todos los estudiantes entre las paradas seleccionadas.

En los SBRP en entornos rurales normalmente cada estudiante es recogido en su casa, pero en entornos urbanos no se comporta de igual forma. En este último caso los estudiantes se dirigen a una parada de autobús a esperar ser recogidos por el mismo. Algunos problemas presentan restricciones de cuál debe ser la distancia máxima entre la casa de los estudiantes y la parada a la que fueron asignados. Los enfoques de las heurísticas de solución en esta etapa se dividen en tres estrategias [10]: la primera conocida como LAR (location-allocation-routing) [11], la segunda conocida como ARL (allocation-routing-location) [12] y la tercera conocida como LRA (location-routing-allocation) [13].



La estrategia LAR primero determina el conjunto de paradas que van a ser visitadas por alguna de las rutas y ubica a todos los estudiantes en estas paradas; luego realiza la planificación de las rutas con las paradas previamente seleccionadas [9]. Por otra parte, la estrategia ARL comienza dividiendo en grupos los estudiantes, teniendo en cuenta no exceder la capacidad de los autobuses; luego realiza la selección de las paradas y se genera una ruta para cada grupo; finalmente se ubican los estudiantes en las paradas seleccionadas, teniendo en cuenta la restricción acerca de la distancia máxima entre la casa de los estudiantes y la parada a la que fueron asignados [9]. La estrategia LRA propone identificar en primer lugar el conjunto de paradas a las que cada estudiante puede llegar, luego planifica las rutas considerando solo las paradas del conjunto previamente definido, minimizando el costo total de ejecutar las rutas, y finalmente asigna los estudiantes a las paradas de autobuses seleccionadas [10].

Generación de las rutas de los autobuses: es un clásico problema de planificación de ruta de vehículos. El resultado final de esta etapa son las rutas confeccionadas. Para esto se pueden seguir dos enfoques. Uno plantea crear una gran ruta que incluya todas las paradas y luego se divide en rutas más pequeñas, cumpliendo con la restricción de capacidad de los ómnibus. El otro enfoque lo plantea en sentido contrario, divide a los estudiantes en grupos y planifica las rutas de forma tal que cada ruta responda a un grupo diferente, y todas deben cumplir con las restricciones del problema.

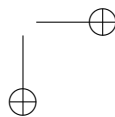
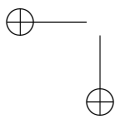
Existen algunos enfoques en los que los subproblemas se trabajan de manera independiente y secuencial, y esto es debido a la complejidad que puede tener el problema a resolver. En gran parte de la literatura solo se consideran para trabajar partes del problema SBRP [9]. Este trabajo plantea un modelo que, según las características que posee, solo abarca la preparación de los datos, la selección de las paradas de los autobuses y la generación de las rutas de los autobuses.

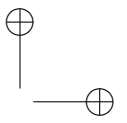
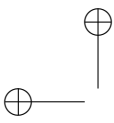
2.1. Características del problema

Cantidad de escuelas: el SBRP puede ser diseñado para satisfacer una o varias escuelas. Generalmente el problema se diseña para modelos con múltiples escuelas, pero existe un gran número de artículos en la literatura que lo modelan para una sola escuela. Algunos de los estudiados con estas características son [2], [13], [14].

Los problemas de una sola escuela son muy similares a los problemas clásicos de VRP, donde se planifica una ruta que comienza en el depósito, visita un conjunto de paradas o clientes, y finalmente regresa al depósito. En un modelo de múltiples escuelas, [15] propone dos enfoques, uno basado en las escuelas y otro basado en las casas. En el enfoque basado en las escuelas se planifica un conjunto de rutas para cada escuela, por tanto, un autobús solo recoge estudiantes de una escuela; y estas rutas deben ajustarse a los horarios de la escuela. El enfoque basado en las casas permite la recogida de estudiantes de diferentes escuelas en un mismo autobús y garantiza que todas las escuelas de los estudiantes recogidos sean visitadas. Este enfoque soporta la característica de carga mixta [15].

Área urbana o rural: el enfoque de solución para el SBRP puede ser diferente si el problema se desarrolla en un entorno urbano o rural. Se asume que, en entornos urbanos, los estudiantes deban recorrer cierta distancia para llegar desde sus casas a la parada donde toman el bus. Por otra parte,





cuando el problema se desarrolla en entornos rurales, la cantidad de estudiantes a transportar es menor y los estudiantes son recogidos en sus hogares. Por tanto, en un entorno rural el paso de selección de las paradas y asignación de estudiantes a paradas se omite [9].

Algunos autores han planteado que, en entornos urbanos con alta densidad de estudiantes, la capacidad de los autobuses es agotada antes de que el tiempo máximo de estancia de los estudiantes en el autobús sea alcanzado [9]. Esto lleva a que [12] plantee que la restricción acerca del tiempo máximo que pueden estar los estudiantes en el autobús no sea fija para todos los problemas.

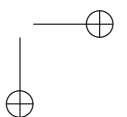
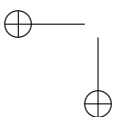
En [16] se plantea que los principales aspectos que hacen que se deban diseñar problemas diferentes para cada uno de estos entornos son: densidad de la población, distancia recorrida por ruta, cantidad de paradas por ruta, características de los caminos por los que deben transitar los ómnibus y depósitos donde los autobuses pasan la noche.

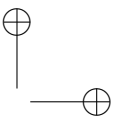
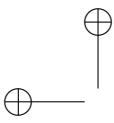
Flota homogénea o heterogénea: una flota heterogénea es aquella en la que los ómnibus que la componen tienen diferentes características entre ellos. Estas pueden ser: capacidad, máximo de tiempo para una ruta y costo por unidad de distancia recorrida. Mientras que, en una flota homogénea, todos los autobuses son iguales y presentan los mismos valores para cada una de las características mencionadas anteriormente [9].

Por otro lado, la mayoría de los estudios asume que cada capacidad en el autobús es destinada a un solo estudiante. Pero en [12] se considera que esto puede variar para cada estudiante según el espacio que ocupe. Por ejemplo, si un estudiante cursa el primer grado de la primaria, ocupa dos tercios de una capacidad de la guagua. Y en estos casos la cantidad de estudiantes que puede recoger cada ómnibus varía dependiendo de las características de los estudiantes que debe recoger.

Función objetivo: la literatura estudiada muestra que los principales objetivos que se persiguen con el diseño de un SBRP son:

- Minimizar la cantidad de autobuses: esto implica que, en cada ruta, la capacidad del autobús sea completada. De esta forma se garantiza que queden desocupados, y por tanto desaprovechados, la menor cantidad de capacidades posible [17], [18].
- Minimizar el costo (distancia o tiempo) total recorrido: se trata de realizar la asignación de los estudiantes y la planificación de rutas de forma tal que se minimice la distancia total a recorrer o el tiempo que consumiría cumplir la planificación de rutas [13], [19].
- Minimizar el tiempo o la distancia que están los estudiantes en el ómnibus: con esta función objetivo se trata de que desde que se monta un estudiante al autobús, hasta el lugar donde se debe bajar, el tiempo (o la distancia) debe ser el menor posible. Esto trata de evitar que los estudiantes hagan viajes muy largos [18], [20].
- Minimizar la distancia que deben recorrer los estudiantes para alcanzar la parada a la que fueron asignados: se trata de ubicar a los estudiantes en paradas cercanas a sus hogares, de forma tal que cada mañana deban recorrer la menor distancia posible hasta alcanzar la parada [11].





- Minimizar el tamaño máximo de la ruta: se busca que la distancia total recorrida por cada ómnibus, en una ruta, sea la menor posible; ya sea visitando menos paradas o visitando paradas cercanas entre sí [21], [22].

Algunos autores como [7], [18], [20], [23] combinan varios de estos objetivos con el fin de encontrar soluciones más apropiadas a entornos particulares y ofrecer un balance entre objetivos económicos y objetivos sociales.

Restricciones: para cada diseño del problema, y dependiendo de la(s) función(es) objetivo(s) que se proponga(n), se puede definir también un conjunto de restricciones. Estas restricciones deben ser garantizadas en la solución brindada. A continuación se muestra una lista con algunas de las restricciones más comunes.

- Capacidad del vehículo [7], [19], [20].
- Tiempo máximo de recorrido de los estudiantes sobre el ómnibus [7], [14].
- Horarios de entrada y salida de las escuelas [19], [20].
- Distancia máxima o tiempo máximo desde la casa de los estudiantes hasta alcanzar las paradas [19], [20].
- Hora de recogida más temprana [24].
- Mínimo de estudiantes para crear una ruta [11].

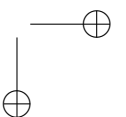
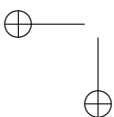
Los valores que definen cada una de estas restricciones resultan de la información brindada por el cliente que desea obtener una planificación de ruta en una situación específica. Estos valores pueden variar entre diferentes instancias.

3. Modelo matemático

En esta sección se presenta una formulación matemática del SBRP, que es diferente del presentado en [13], donde se había enfocado esto desde la visión de Programación Lineal Entera. Para poder aplicar el modelo diseñado a la planificación de rutas de autobuses escolares, el problema debe cumplir con las siguientes características:

1. Una sola escuela de origen y destino de todos los estudiantes.
2. Todos los estudiantes son iguales y ninguno requiere de tratamiento especial.
3. Todos los autobuses tienen igual capacidad de transportación y dicha capacidad es fija.

A continuación se presenta el modelo propuesto, el cual, aunque su base conceptual es similar a la formulación de programación entera presentada en [13], tiene un enfoque más orientado a su implementación y solución con un enfoque metaheurístico.



Variables de entrada:

c : capacidad de cada autobús

b : cantidad de autobuses

d : distancia máxima que pueden caminar los estudiantes

P : conjunto de posibles paradas

E : conjunto de estudiantes

C_p : conjunto de vectores con pares de coordenadas de posibles paradas

$$C^p = \{c_0^p, c_1^p, \dots, c_{|p|}^p\} \text{ donde } c^p = \langle x', y' \rangle$$

c_0^p : contiene las coordenadas de la escuela

x'_p : coordenada x de la parada p

y'_p : coordenada y de la parada p

C_e : conjunto de vectores con pares de coordenadas de la casa de cada estudiante

$$C^e = \{c_0^e, c_1^e, \dots, c_{|e|}^e\} \text{ donde } c^e = \langle x'', y'' \rangle$$

x''_e : representa la coordenada x de la ubicación del estudiante e

y''_e : representa la coordenada y de la ubicación del estudiante e

Variables intermedias:

C_{ij} : matriz de costo entre cada par de paradas (i, j)

$$C_{ij} = \begin{cases} D(c_i^p, c_j^p), & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases} \quad \forall i, \forall j \in P$$

S_{pe} matriz binaria. 1 si el estudiante e puede alcanzar la parada p y 0 en caso contrario

$$S_{pe} = \begin{cases} 1 & D(c_p^p, c_e^e) \leq d \\ 0, & D(c_p^p, c_e^e) > d \end{cases} \quad e \in E, p \in P - \{p_0\}$$

$$D = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

Se utiliza la fórmula de distancia euclidiana para el cálculo de la matriz de costo entre paradas, pero se puede sustituir por cualquier otra fórmula de distancia.

Variables de decisión:

R_{km} : indica la parada que es visitada por la ruta k en orden m

Z_e : indica la parada donde es recogido el estudiante e

Función objetivo:

$$\text{minimizar} \quad \sum_{k=1}^b \sum_{m=1}^{|P|-1} C_{[R_{km}][R_{km+1}]} \quad (1)$$

Restricciones:

$$|\{R_{km} | R_{km} = p\}| \leq 1 \quad \forall p \in P - \{p_0\}, \forall k \in \{1, \dots, b\}, \forall m \in \{1, \dots, |P|\} \quad (2)$$

$$\{(e, p) | Z_e = p\} \subseteq \{(e, p) | S_{pe} = 1\} \quad \forall e \in E, \forall p \in P \quad (3)$$

$$|\{E | \exists m R_{km} = Z_e\}| \leq c \quad m \in \{0, \dots, |P|\}, \forall k \in \{1, \dots, b\}, \forall e \in E, \quad (4)$$

$$|\{R_{km} | Z_e = R_{km}\}| = 1 \quad \forall e \in E \quad (5)$$

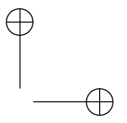
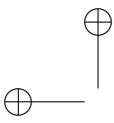
La función objetivo (1) minimiza la distancia total recorrida por toda la flota de autobuses. Las ecuaciones (2), (3), (4) y (5) son restricciones que se deben cumplir para que la solución sea factible. La restricción (2) garantiza que cada parada sea visitada como máximo una sola vez, exceptuando la parada p_0 que representa la escuela, destino final de todos los autobuses. La restricción (3) asegura que cada estudiante pueda alcanzar la parada a la que fue asignado para tomar el autobús. La restricción (4) tiene en cuenta que en la ruta de cada autobús no se exceda la capacidad del mismo. La restricción (5) garantiza que cada parada, a la que se asigna al menos un estudiante, sea visitada por un autobús.

En este artículo se propone un nuevo modelo, y no se utiliza el mismo modelo propuesto en [13]. Esto se debe a que el modelo propuesto en [13] tiene una formulación de programación entera y por este motivo presenta una cantidad mayor de variables de decisión y una mayor cantidad de restricciones. Con el modelo planteado, muchas de las restricciones del modelo de [13] son garantizadas, quedando solo cuatro restricciones para el modelo propuesto.

4. Solución propuesta

Los algoritmos metaheurísticos son algoritmos aproximados que combinan métodos heurísticos a un nivel más alto para conseguir una exploración del espacio de búsqueda de forma eficiente y efectiva. Varios estudios han demostrado la habilidad de estos métodos para resolver problemas de optimización complejos en un tiempo computacional razonable [8]. Estos algoritmos acoplan procedimientos de mejora local y estrategias a nivel más alto, lo que los hace ser capaces de escapar de óptimos locales [25].

Los algoritmos metaheurísticos pueden ser clasificados según su trayectoria en dos grupos [8]: basados en un punto o algoritmos de trayectoria, y basados en poblaciones de puntos. Los algoritmos basados en una trayectoria son técnicas que parten de un punto inicial y van renovando la



solución actual. Por otro lado, los algoritmos basados en poblaciones se caracterizan por trabajar con un conjunto de soluciones en cada iteración [8].

Para encontrar soluciones al modelo planteado, se utilizaron los siguientes algoritmos metaheurísticos basados en un punto, implementados en la biblioteca de algoritmos metaheurísticos BiCIAM [26]: escalador de colinas (EC), escalador de colinas con reinicio (ECR), escalador de colinas de mejor ascenso (ECMA), búsqueda aleatoria (BA), recocido simulado (RS), búsqueda tabú (BT) y portafolio de algoritmos (PA).

Implementación del modelo propuesto haciendo uso de BiCIAM: BiCIAM contiene el paquete `problem.definition`, conformado por las clases que abstraen el problema del algoritmo, permitiendo que sean empleadas para definir cualquier situación o problema. Por ello se implementaron las clases *SBRP_Codification* (hereda de *Codification*), *SBRP_Model*, *SBRP_ObjectiveFunction* (hereda de *ObjectiveFunction*), *SBRP_Operator* (hereda de *Operator*) y *SBRP_Tester*.

En la Figura 1 se ilustra el diagrama que refleja las clases definidas para la implementación del problema SBRP que hace uso de la biblioteca BiCIAM. Se representan las clases principales del modelo del problema, con sus atributos y métodos más importantes. Las clases que se resaltan en morado son aquellas que pertenecen a la biblioteca BiCIAM.

Las principales responsabilidades de estas clases se describen a continuación en la Tabla I.

4.1. Construcción de la solución inicial

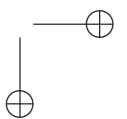
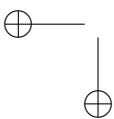
La construcción de una solución para el problema planteado consta de dos pasos: la selección de las paradas y la asignación de los estudiantes, y la planificación de las rutas. En este caso, se siguió la estrategia LAR comentada anteriormente.

Construcción de la variable `studentToStop`: para realizar la asignación de los estudiantes a una parada del conjunto de posibles paradas se desarrollaron dos algoritmos: *studentToRandomStop()* y *studentToFirstStop()*. A continuación, se brinda una descripción de cada uno de estos métodos.

studentToRandomStop(): para cada estudiante se selecciona un conjunto de paradas $C^{p'}$, donde $C^{p'} \subseteq C_p$, que contiene las paradas a las que puede ser asignado el estudiante, cumpliendo con la restricción de distancia máxima entre su hogar y la parada. Finalmente se escoge la parada para el estudiante de forma aleatoria del conjunto $C^{p'}$.

studentToFirstStop(): para cada estudiante se selecciona un conjunto de paradas $C^{p'}$, donde $C^{p'} \subseteq C_p$, que contiene las paradas a las que puede ser asignado el estudiante, cumpliendo con la restricción de distancia máxima entre su hogar y la parada. Finalmente se escoge la parada que ocupa la primera posición del conjunto $C^{p'}$ para ubicar al estudiante.

Para ambas formas de construcción inicial, en caso de que la parada seleccionada de forma aleatoria ya tenga asignado un número de estudiantes igual a la capacidad de los vehículos, se intenta insertar al estudiante en alguna de las otras paradas del conjunto $C^{p'}$. Esto se realiza respetando el



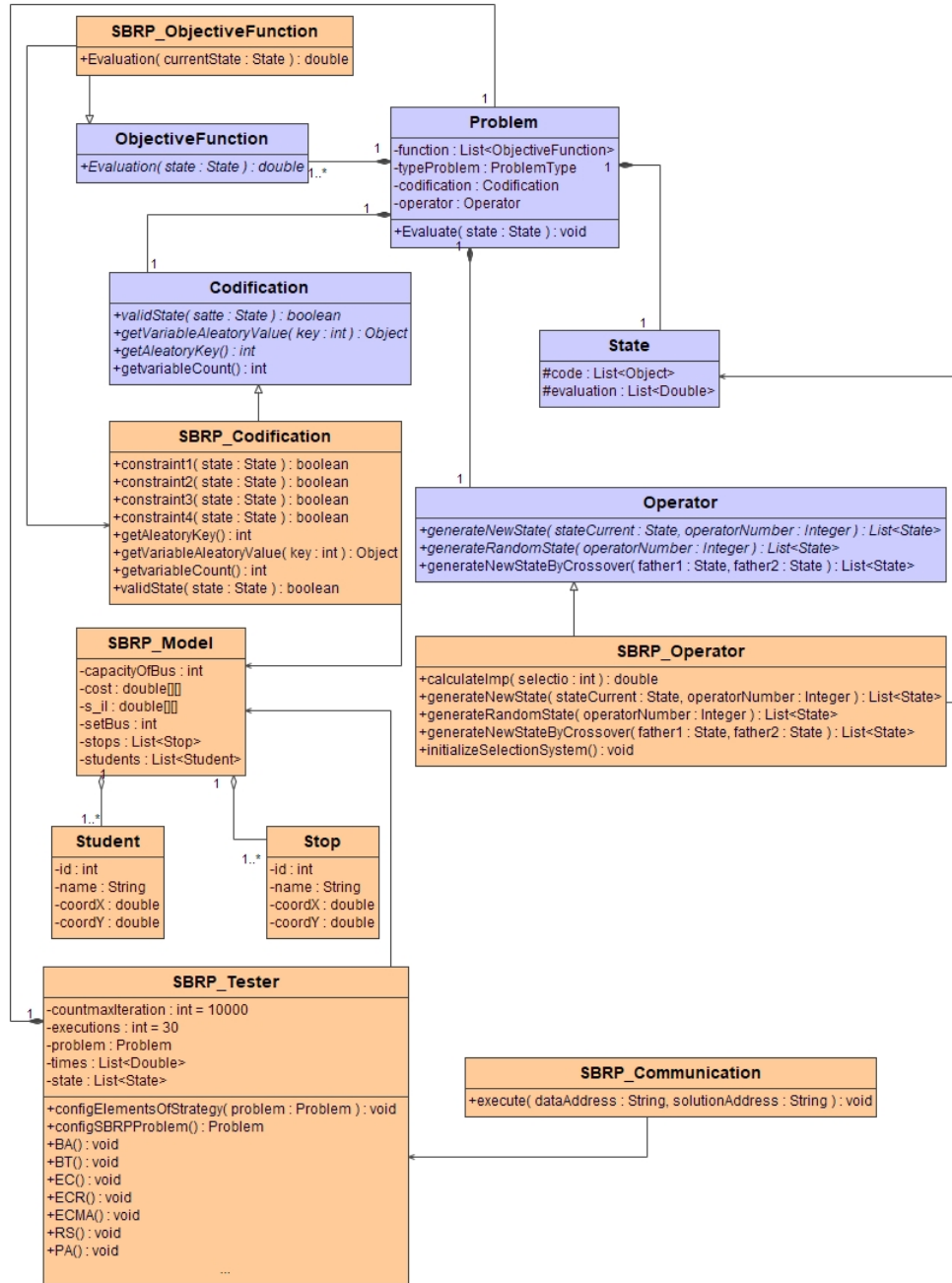


Figura 1. Diagrama de clases del SBRP

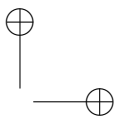
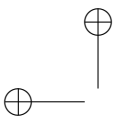
Tabla I. Descripción de las clases del paquete *problem.definition*

<i>Clase</i>	<i>Descripción</i>
<i>SBRP_Codification</i>	Tiene como objetivo redefinir el método <i>validState()</i> , utilizado para conocer si un estado es válido o no.
<i>SBRP_Model</i>	<p>Contiene los datos sobre la instancia del problema que se desea resolver. Estos datos son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>capacityOfBus</i>: capacidad de los ómnibus, que, al representar un problema de flota homogénea, es igual para todos. • <i>cost</i>: matriz de costo entre cada par de paradas. • <i>s_il</i>: matriz que indica qué parada puede ser asignada a cada estudiante. • <i>setBus</i>: cantidad de ómnibus que conforman la flota. • <i>stops</i>: conjunto de posibles paradas. • <i>students</i>: conjunto de estudiantes a ubicar.
<i>SBRP_ObjectiveFunction</i>	Tiene como objetivo redefinir el método <i>evaluation()</i> , encargado de devolver la evaluación de un estado en la función objetivo. En este caso, la distancia total que recorren los autobuses al recorrer las rutas definidas en la codificación del estado.
<i>SBRP_Operator</i>	<p>Tiene como objetivo implementar los operadores que se van a aplicar, y tiene dos funcionalidades importantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>generatedNewState()</i>: genera de manera aleatoria una variable del estado y un valor que cumpla con el dominio, ubica en esa variable el valor generado y devuelve el estado resultante. • <i>generateRandomState()</i>: genera un estado aleatoriamente y lo devuelve.
<i>SBRP_Tester</i>	Implementa algunos métodos responsables de la configuración del problema y de las estrategias que se aplicarán para intentar darle solución.

mismo orden que presenta el conjunto, y siempre garantizando que no se asignen a una parada más estudiantes de los que permite un vehículo.

Construcción de la variable *routes*: para realizar la planificación de las rutas se propuso un único método, que lo hace de forma semialeatoria y garantiza el cumplimiento de las restricciones (2) y (3), llamado *stopCompletingFirstRoute()*. A continuación, se brinda una descripción del mismo.

stopCompletingFirstRoute(): por cada ruta se selecciona un conjunto de paradas C^{p^i} , donde $C^{p^i} \subseteq C_p$, que contiene todas aquellas paradas donde fue asignado al menos un estudiante y que contienen un número de estudiantes que aún pueden ser insertados a la ruta sin exceder la capacidad de los vehículos. Se van seleccionando de manera aleatoria las paradas para completar la ruta de dicho conjunto, y se va actualizando según la disponibilidad de la capacidad de la ruta. Una vez que el conjunto esté vacío, se debe crear una nueva ruta, la cual se llena siguiendo el mismo procedimiento. Si al satisfacer la capacidad de la última ruta, aún quedan paradas por ubicar, se incorporan en esta ruta y la solución generada no resulta factible.



4.2. Operadores de mutación

Muchas de las variantes de VRP utilizan combinaciones de operadores de vecindad para las habituales búsquedas locales. Los operadores que se combinan pueden introducir cambios en una sola ruta o entre varias de ellas [27]. En el SBRP, como variante de VRP, también es posible aplicar este tipo de operadores.

Para la búsqueda de vecindad fueron implementados los siguientes operadores:

Operador Swap [27]: intercambia dos puntos de recogida de estudiantes. Los puntos de recogida pueden ser seleccionados de una misma ruta [28], o de diferentes rutas [20]. Para implementarlo se seleccionan aleatoriamente dos rutas, R_1 y R_2 , y de cada una de ellas se selecciona aleatoriamente un nodo. Finalmente se intercambian los puntos de recogida obtenidos p_{1i} y p_{2j} . Si R_1 y R_2 son iguales, el cambio realizado involucrará solo una ruta; de otro modo el intercambio será entre dos rutas.

Operador Two-Opt [27]: El resultado de la aplicación de este operador es el intercambio de una subcadena en una ruta. Para la implementación del mismo, inicialmente se escoge de manera aleatoria una ruta R . Luego se seleccionan aleatoriamente dos nodos de la ruta escogida, p_{r_1} y p_{r_2} , de forma tal que $(1 \leq p_{r_1} \leq p_{r_2} \leq |R|)$. Finalmente se invierte la cadena p_{r_1}, \dots, p_{r_2} perteneciente a R .

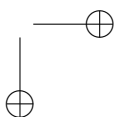
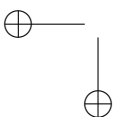
Operador Section Swap [27]: el objetivo de aplicar este operador es intercambiar dos subcadenas de nodos. Ambas subcadenas tendrán igual tamaño. Para la implementación del operador inicialmente se seleccionan aleatoriamente dos rutas, R_1 y R_2 , garantizando que $R_1 \neq R_2$. Luego se selecciona de forma aleatoria la longitud de las subcadenas, teniendo en cuenta que no deben exceder el tamaño de las rutas previamente escogidas. Posteriormente se define en qué posición comenzará la subcadena en cada una de las rutas. Finalmente se intercambia cada uno de los elementos entre ambas subcadenas.

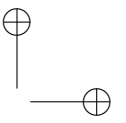
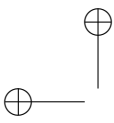
4.2.1. Mecanismo de selección de los operadores

Para la búsqueda local, se aplica un mecanismo que sigue la idea de un sistema clasificador o un portafolio de algoritmos [26], los cuales son “adaptativos”, ya que su capacidad de elegir la mejor acción mejora con la experiencia. Cada operador tiene un peso, y la probabilidad de selección en cada iteración es directamente proporcional a este peso. En cada iteración es seleccionado uno de ellos por probabilidades, y en función del resultado que se obtenga se realizan dos operaciones: se penaliza al operador seleccionado por su utilización, y se premia si obtuvo una mejor solución que la anterior. Con estas operaciones, van siendo modificados los pesos, y por tanto las probabilidades de selección. Siendo en cada iteración más propensa la probabilidad de seleccionar un operador que logra mejoras que otro que no mejora la solución.

La función aplicada para actualizar los pesos es la siguiente:

$$W_i(t+1) = W_i(t) - I_i(t) + R_i(t)$$





Una solución metaheurística al problema de planificación de rutas de autobuses escolares con flota homogénea. . .

donde:

$W_i(t + 1)$ es el peso de la regla en la próxima iteración

$W_i(t)$ es el peso actual de la regla

$I_i(t)$ es el impuesto que se le cobra a la regla por activarse. t representa el instante de tiempo actual

$$I_i(t) = W_i(t) \cdot C$$

C es la constante de impuesto, con valor entre 0 y 1

$Ri(t)$ es la recompensa que se le da a la regla por su respuesta, 0 si la respuesta es peor que la anterior y Rec si es correcta, donde Rec es una constante positiva, de tal forma que la calidad de la regla varíe de acuerdo a su respuesta.

Para el problema, se definieron los siguientes valores:

$$C = 0,15$$

$$Rec = 8,5$$

$$W_0 = 50 \text{ para todos los operadores}$$

5. Experimentación

5.1. Descripción del conjunto de instancias de prueba

En una reciente revisión del estado del arte en este problema se reconoce que son escasas las instancias de prueba que se usan para comparar las soluciones al problema [10]. Los experimentos que aquí se presentan son realizados sobre un conjunto de 112 instancias generadas en [13], que son las que pudieron obtenerse a partir de solicitudes a los autores. Las instancias van desde las más simples con cinco paradas y 25 estudiantes a las más complejas donde se deben ubicar 800 estudiantes en 80 paradas. Las instancias tienen una flota homogénea que puede ser de ómnibus de capacidad de 25 o 50. Es considerado como parámetro de cada instancia el valor de la distancia que se corresponde al máximo que puede ser recorrido por los estudiantes hasta llegar a la parada.

A continuación, la Tabla II muestra de forma resumida las características de las instancias del conjunto de prueba con los valores que pueden tomar.

5.2. Análisis de los resultados

Según el teorema No Free Lunch (NFL, por sus siglas en inglés) planteado en [29], no existe ningún algoritmo de optimización que sea mejor que otro sobre la totalidad de los problemas. NFL plantea que, aplicando los algoritmos de búsqueda a todos los tipos de problemas existentes, todos tienen similar comportamiento en promedio. Debido a esto, se optó por experimentar con varios algoritmos y realizar pruebas no paramétricas para comparar sus resultados, utilizando la prueba

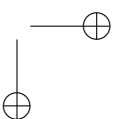
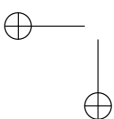


Tabla II. Características del conjunto de instancias de prueba

Características de las instancias	Rango de valores
Cantidad de estudiantes	25, 50, 100, 200, 400, 800
Cantidad de paradas	5, 10, 20, 40, 80
Tamaño de la flota	5, 10, 20, 40, 80
Capacidad de cada autobús	25, 50
Distancia máxima que pueden caminar los estudiantes	5, 10, 20, 40
Total de Instancias	112

estadística de Friedman para conocer si presentan diferencias significativas entre ellos para este problema.

En una primera experimentación se compararon varios algoritmos metaheurísticos para encontrar los que mejor funcionan en este problema. Se experimentó con los siguientes algoritmos: EC, ECR, ECMA, BA, RS, BT, PA. El PA se aplica con la combinación de los siguientes algoritmos: EC, ECR, BA, RSC y BT. Se realizaron, para todos los algoritmos, 30 ejecuciones con 10.000 iteraciones, a partir de la generación de una solución inicial. Para esta experimentación se utilizaron 40 instancias, seleccionadas de manera aleatoria del conjunto de instancias descritas previamente. Cada uno de los algoritmos se probó con las dos formas de construcción inicial para la asignación de estudiantes descritas anteriormente: Random (*studentToRandomStop()*) y FirstStop (*studentToFirstStop()*). Se aplicó el test de Friedman [30] para comparar los resultados.

Teniendo en cuenta los resultados del test de Friedman, se puede concluir que la aplicación del portafolio de algoritmos con el método FirstStop para la asignación inicial de los estudiantes a las paradas es el algoritmo que mejores resultados obtiene según el ranking de Friedman (ranking promedio de 4,175) y p-valor de Friedman menor que 0,05, indicando que hay diferencias significativas entre los algoritmos del experimento. A pesar de lo mencionado, se puede observar que los algoritmos ECMA_FS, ECR_FS, EC_FS, BA_FS presentan en los análisis de los *post hoc* [30], valores de p_valor $\geq 0,05$, lo que indica que no presentan diferencias significativas en los resultados obtenidos del portafolio respecto a estos, para un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

Además, se puede afirmar que, en promedio, los algoritmos obtienen mejores resultados cuando la asignación inicial de los estudiantes a las paradas se realiza con el método FirstStop previamente descrito, en lugar de aplicar el método Random.

Luego de este análisis se pasó a otra experimentación. En este caso fueron ejecutados los algoritmos que obtuvieron mejores resultados (portafolio de algoritmos y escalador de colinas con mejor ascenso) para cada una de las instancias del conjunto descrito, para ser comparados con el estado de arte en el tema [13]. A continuación, la Tabla III muestra los resultados obtenidos por los algoritmos PA y ECMA. Ambos algoritmos ejecutados con la forma de construcción inicial propuesta en la sección anterior. La tercera columna de la tabla, identificada como MH muestra los resultados obtenidos por [13] con una metaheurística GRASP+VND para las instancias utilizadas.

En un análisis de los resultados plasmados en la Tabla III, se puede apreciar que en la mayoría de los casos, los dos algoritmos propuestos en este trabajo obtienen la misma solución, ratificando el resultado obtenido con el Test de Friedman, según el cual ambos algoritmos no presentaban diferencias significativas en los resultados. También es posible apreciar que solo en un 14,2 % de las instancias, los algoritmos propuestos alcanzan el mejor valor conocido obtenido en [13]. Como resultado positivo, en un 5,3 % de las instancias se obtuvieron resultados mejores que los obtenidos en la fuente previamente mencionada. Es decir, para estas instancias, las soluciones obtenidas en este trabajo no habían sido obtenidas antes con metaheurísticas.

Es importante destacar que los algoritmos propuestos son competitivos respecto al algoritmo planteado en [13], en las instancias en las cuales la distancia máxima que pueden caminar los estudiantes es 5, el menor valor para esta característica en el conjunto de instancias evaluado. Para las instancias en las que esta característica tiene valor 40, se obtienen soluciones hasta dos veces mayores que las obtenidas en [13]. Esto se debe a que en este trabajo no se consideraron operadores que actúen sobre la estructura que representa la asignación de estudiantes a paradas, lo cual indica hacia dónde se debe enfocar la investigación en trabajos futuros. La inclusión de estos nuevos operadores no resultaría una tarea compleja, debido al diseño de la solución, incluido el uso de la biblioteca de clases BiCIAM, mencionada anteriormente.

Al hacer un análisis de los tiempos de ejecución de cada uno de los algoritmos, en la Figura 2, se puede apreciar que para las instancias de menor complejidad, aquellas donde la cantidad de paradas es menor que 20 y la cantidad de estudiantes menos que 100, los tiempos de la solución propuesta son más altos que los tiempos del algoritmo de la literatura, aunque la diferencia nunca llega a superar los 20 segundos. Para las instancias de mayor complejidad, aquellas con la cantidad de paradas mayor o igual a 20 y la cantidad de estudiantes mayor o igual a 200, es importante destacar que el algoritmo propuesto obtiene los resultados en tiempos mucho menores que los obtenidos en [13]. El tiempo máximo para obtener resultados en [13] es de una hora (3.600 segundos), mientras que, con la solución propuesta, el tiempo máximo que demora es alrededor de diez minutos. Disminución importante en cuanto al rendimiento de los algoritmos.

Por otra parte, el tiempo promedio de diferencia cuando MH es más rápido que PA es de aproximadamente 8 segundos, mientras que el promedio de la diferencia cuando PA es más rápido que MH es de aproximadamente 1,180 segundos (20 minutos). Esto implica que, a mayor complejidad del problema, la solución propuesta logra ahorrar más, llegando a ser diez veces más rápida en varias de estas instancias. Esto resulta muy conveniente cuando se desean utilizar estos algoritmos en aplicaciones prácticas.

En general, los resultados experimentales muestran algunas de las bondades de la solución propuesta:

- Los resultados obtenidos en seis instancias son los mejores reportados con metaheurísticas y en 16 instancias se igualan las mejores referencias, lo cual muestra que el enfoque es eficaz. De las seis instancias en las que se supera la mejor solución obtenida con metaheurísticas, en una se alcanza el óptimo, mientras que en las restantes cinco los resultados alcanzados pasan a ser referencia para futuras investigaciones.

Tabla III. Resultados del análisis

	PA	ECMA	MH		PA	ECMA	MH
inst1-1s5-25-c25-w5	141,01	141,01	141,01	inst62-5s20-200-c50-	311,61	311,61	250,75
inst2-7s5-25-c50-w5	161,62	161,62	161,62	inst63-10s20-200-	152,20	152,20	93,01
inst3-1s5-25-c25-w10	182,14	182,14	182,14	inst64-2s20-200-c50-	79,32	79,32	45,40
inst4-10s5-25-c50-	195,80	195,80	195,80	inst65-9s20-400-c25-	1.326,5	1.326	1.323,3
inst5-4s5-25-c25-w20	133,76	133,76	111,65	inst66-9s20-400-c50-	759,53	786,13	733,54
inst6-5s5-25-c50-w20	106,16	106,16	103,18	inst67-5s20-400-c25-	1.011,4	1.011	975,12
inst7-8s5-25-c25-w40	36,67	36,67	7,63	inst68-2s20-400-c50-	646,97	646,96	614,67
inst8-8s5-25-c50-w40	48,15	48,15	25,64	inst69-4s20-400-c25-	919,31	919,31	763,76
inst9-4s5-50-c25-w5	286,68	286,68	286,68	inst70-8s20-400-c50-	416,01	420,18	298,47
inst10-1s5-50-c50-w5	197,20	197,20	197,20	inst71-6s20-400-c25-	280,75	280,75	239,58
inst11-1s5-50-c25-	204,97	204,97	193,55	inst72-5s20-400-c50-	115,67	115,67	84,49
inst12-5s5-50-c50-	215,86	215,86	215,86	inst73-5s40-200-c25-	860,62	870,00	831,94
inst13-5s5-50-c25-	131,98	131,98	130,53	inst74-9s40-200-c50-	628,40	587,71	593,35
inst14-5s5-50-c50-	96,26	96,26	96,26	inst75-10s40-200-	827,50	829,68	728,44
inst15-1s5-50-c25-	19,41	19,41	12,89	inst76-10s40-200-	537,87	557,85	481,05
inst16-1s5-50-c50-	30,24	30,24	30,24	inst77-6s40-200-c25-	530,27	530,27	339,75
inst17-5s5-100-c25-	360,35	360,35	360,35	inst78-1s40-200-c50-	348,57	348,57	273,88
inst18-2s5-100-c50-	304,23	304,23	304,23	inst79-3s40-200-c25-	163,50	163,50	76,77
inst19-6s5-100-c25-	294,21	294,21	294,21	inst80-8s40-200-c50-	111,20	111,20	58,46
inst20-1s5-100-c50-	236,87	236,87	229,41	inst81-9s40-400-c25-	1.448,6	1.439	1.407,0
inst21-7s5-100-c25-	157,64	157,64	134,95	inst82-3s40-400-c50-	886,48	879,86	858,80
inst22-10s5-100-c50-	196,04	196,04	144,41	inst83-4s40-400-c25-	1.068,4	1.029	891,02
inst23-2s5-100-c25-	76,82	76,82	58,95	inst84-4s40-400-c50-	924,01	880,88	757,42
inst24-3s5-100-c50-	56,49	56,49	39,44	inst85-6s40-400-c25-	897,66	882,58	586,29
inst25-10s10-50-c25-	242,85	242,85	242,85	inst86-10s40-400-	589,63	581,79	395,95
inst26-2s10-50-c50-	282,17	282,17	282,12	inst87-6s40-400-c25-	300,89	300,89	195,33
inst27-8s10-50-c25-	274,83	274,83	244,54	inst88-6s40-400-c50-	109,51	109,51	70,77
inst28-6s10-50-c50-	288,33	288,33	288,33	inst89-5s40-800-c25-	2.978,6	2.978	2.900,1
inst29-8s10-50-c25-	110,32	110,32	108,98	inst90-2s40-800-c50-	1.402,6	1.391	1.345,7
inst30-5s10-50-c50-	180,89	180,89	157,48	inst91-4s40-800-c25-	2.409,4	2.409	2.200,5
inst31-7s10-50-c25-	34,22	34,22	32,25	inst92-9s40-800-c50-	1.223,4	1.240	1.025,1
inst32-6s10-50-c50-	67,36	67,36	36,66	inst93-6s40-800-c25-	1.661,3	1.661	1.404,1
inst33-1s10-100-c25-	403,18	403,18	403,18	inst94-3s40-800-c50-	914,67	914,67	616,58
inst34-7s10-100-c50-	298,40	298,40	296,53	inst95-7s40-800-c25-	452,73	452,73	396,92
inst35-10s10-100-	408,63	408,63	388,87	inst96-8s40-800-c50-	323,11	323,11	200,94
inst36-1s10-100-c50-	296,50	296,50	294,80	inst97-8s80-400-c25-	1.743,4	1.800	1.546,2
inst37-7s10-100-c25-	227,51	227,51	178,28	inst98-2s80-400-c50-	1.438,5	1.364	1.048,5
inst38-9s10-100-c50-	200,43	200,43	175,96	inst99-1s80-400-c25-	1.624,5	1.592	1.216,7
inst39-5s10-100-c25-	93,42	93,42	57,50	inst100-9s80-400-	1.044,9	974,35	760,61
inst40-4s10-100-c50-	54,63	54,63	31,89	inst101-3s80-400-	984,57	977,04	565,49
inst41-3s10-200-c25-	735,27	735,27	735,27	inst102-5s80-400-	586,50	585,50	372,05
inst42-1s10-200-c50-	506,06	506,06	512,16	inst103-9s80-400-	271,81	271,81	131,75
inst43-4s10-200-c25-	516,00	516,00	513,00	inst104-8s80-400-	166,07	166,07	95,84
inst44-1s10-200-c50-	493,83	493,83	475,21	inst105-4s80-800-	2.940,0	2.878	2.527,9
inst45-3s10-200-c25-	394,19	394,19	347,29	inst106-10s80-800-	1.883,4	1.807	1.530,5
inst46-4s10-200-c50-	274,40	274,40	217,46	inst107-7s80-800-	2.316,8	2.344	1.809,9
inst47-1s10-200-c25-	120,96	120,96	102,93	inst108-6s80-800-	1.630,9	1.568	1.187,5
inst48-1s10-200-c50-	82,85	82,85	55,05	inst109-3s80-800-	1.688,4	1.748	1.110,4
inst49-1s20-100-c25-	507,81	524,58	520,24	inst110-6s80-800-	1.093,9	1.058	623,03
inst50-1s20-100-c50-	408,36	408,36	420,64	inst111-1s80-800-	479,30	479,30	311,41
inst51-7s20-100-c25-	443,13	452,87	422,21	inst112-5s80-800-	269,63	269,63	126,06
inst52-4s20-100-c50-	374,52	385,09	360,86				
inst53-2s20-100-c25-	383,03	389,38	245,17				
inst54-7s20-100-c50-	221,24	221,24	185,06				
inst55-7s20-100-c25-	107,52	107,52	52,52				
inst56-9s20-100-c50-	47,75	47,75	19,05				
inst57-8s20-200-c25-	887,33	887,33	903,84				
inst58-5s20-200-c50-	484,90	489,19	485,65				
inst59-9s20-200-c25-	690,36	690,11	616,93				
inst60-5s20-200-c50-	482,6	522,71	462,31				
inst61-6s20-200-c25-	535,75	535,75	373,21				

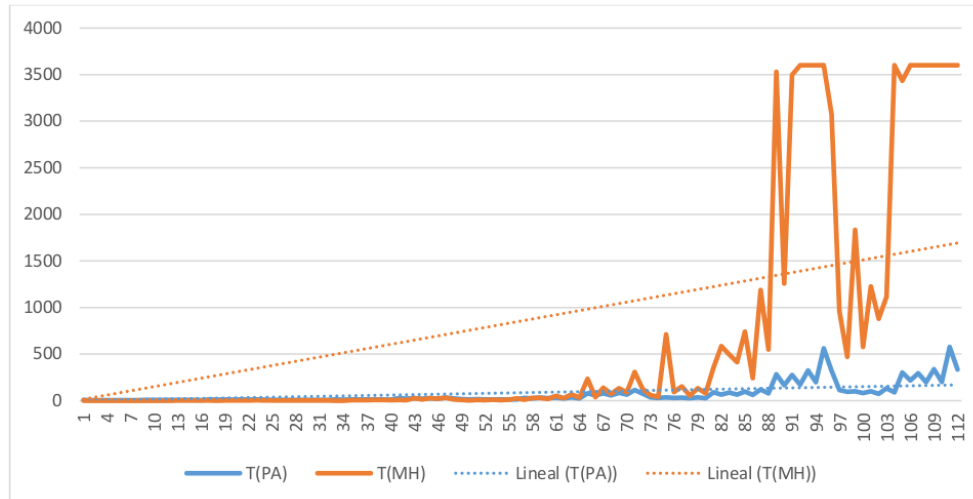


Figura 2. Tiempos de ejecución, en segundos, en las 112 instancias para los algoritmos MH y PA

- El tiempo de solución del enfoque propuesto es significativamente superior a los previamente reportados en un porcentaje alto de las instancias, y no existen instancias en las que el tiempo de la propuesta sea sustancialmente peor, lo cual demuestra la eficiencia del enfoque propuesto.
- Se lograron identificar las características de las instancias en las cuales deben enfocarse las mejoras futuras (distancia máxima a caminar por los estudiantes).
- Al presentarse el diseño flexible de la solución con los artefactos adecuados de lenguaje unificado de modelado (UML, por su sigla en inglés, Unified Modeling Language) permite que estos resultados puedan ser aplicados, reutilizados y mejorados en futuras investigaciones. Por ejemplo, permite de manera simple la inclusión de nuevos operadores que mejoren la eficacia del algoritmo en las instancias que así lo requieran.

6. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se han cumplido con los objetivos propuestos. Se hizo un estudio del estado del arte donde se consultó la literatura principal sobre el problema de planificación de rutas de autobuses escolares (SBRP), y las diferentes variantes para su aplicación. En dicho estudio se puede constatar que el SBRP tiene un amplio campo de aplicación gracias a su flexibilidad y la gran cantidad de variaciones que soporta para ajustarse a muchas situaciones de la vida real. Además, se puede concluir que:

- El modelo propuesto permite representar el problema y encontrar soluciones para el mismo a través de los algoritmos desarrollados, lo que se puede comprobar a partir de los resultados descritos.

- La implementación de este modelo, y los algoritmos correspondientes, se simplificó en gran medida, tanto en tiempo como en dificultad de implementación, gracias a la utilización de la biblioteca BiCIAM, la cual aporta un conjunto de funcionalidades reutilizables con este objetivo y permite la utilización de las metaheurísticas ya implementadas.
- Tanto las metaheurísticas utilizadas, portafolio de algoritmos y escalador de colinas con mejor ascenso, heredadas de BiCIAM, como los operadores desarrollados fueron sencillas de implementar y poseen tiempos de ejecución adecuados en la obtención de los resultados descritos. La utilización de un mecanismo de selección de operadores de mutación, tipo portafolio y basado en una estrategia de penalización-premio, permite que la búsqueda sea dirigida en cada iteración hacia mejores soluciones.
- Partiendo de los resultados de la literatura en 16 instancias que representan el 14,2 % del total se igualaron los resultados obtenidos, mientras que en 6 que representan el 5,3 % del total, los resultados aquí alcanzados fueron superiores. Estos porcentajes indican que, a pesar de que es necesario hacer ajustes y mejoras a los algoritmos desarrollados, para algunas instancias es posible obtener buenos resultados.
- Los resultados alcanzados con los algoritmos propuestos son más competitivos con respecto a la calidad de la solución, en instancias donde la distancia máxima a caminar por los estudiantes tiene su menor valor (5), mientras que los peores resultados se alcanzan cuando esta distancia tiene el mayor valor del conjunto (40).
- Desde el punto de vista del tiempo de ejecución, en sentido general, la propuesta obtiene muy buenos resultados. Mientras que para instancias de complejidad relativamente simple se obtienen tiempos comparativamente similares, para instancias de gran complejidad, la propuesta ofrece mejores tiempos que los algoritmos de la literatura analizados.

Teniendo en cuenta los resultados y estas conclusiones, el trabajo futuro en esta línea de investigación debe enfocarse en mejorar aún más la calidad de las soluciones obtenidas, para lo cual es necesario implementar estrategias de reparación para las soluciones no factibles, lo que disminuiría notablemente la cantidad de soluciones no factibles exploradas. Asimismo, implementar operadores que actúen sobre la estructura que representa la asignación de estudiantes a paradas, debido a que esto llevaría a un mayor espacio de soluciones, en el cual pudieran existir mejores resultados que los obtenidos. Por último, llevar a cabo la solución del modelo planteado a partir de metaheurísticas poblacionales, pues son de las más utilizadas en la literatura y pueden aportar mejores resultados.

Referencias

- [1] R. Newton, and W. Thomas, "Design of school bus routes by computer", *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 75-85, 1969. [https://doi.org/10.1016/0038-0121\(69\)90051-2](https://doi.org/10.1016/0038-0121(69)90051-2) ↑234, 236
- [2] L. Li, and Z. Fu, "The school bus routing problem: A case study", *Journal of the Operational Research Society*, vol. 53, no. 5, pp. 552-558, 2002. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601341> ↑234, 235, 237
- [3] F. Machado, D. Simões, S. Vieira, N. Ramos, "A mixed load capacitated rural school bus routing problem with heterogeneous fleet: Algorithms for the Brazilian context", *Expert Systems with Applications*, vol. 56, pp. 320-334, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.03.005> ↑234

- [4] M. Fonseca, J. Sarubbi, C. Silva, M. Porto, and N. Ramos, "A real geographical application for the school bus routing problem", 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2014.6958132> ↑235, 236
- [5] E. López y J. Romero, "Un aproximación híbrida de generación de columnas y agrupación para resolver el problema de ruteo de buses escolares con ventanas de tiempo", *Ingeniería*, vol. 20, no. 1, pp. 111-127, 2015. <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2015.1.a07> ↑235
- [6] A. Bock, E. Grant, J. Könemann, and L. Sanità, "The school bus problem on trees", *Algorithmica*, vol. 67, pp. 49-64, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00453-012-9711-x> ↑235, 236
- [7] D. Moura, R. de Camargo, S. Conceição, M. Porto, and N. Nunes, "A multi-loading school bus routing problem", *Expert Systems with Applications*, vol. 101, pp. 228-242, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.02.014> ↑235, 239
- [8] E. Talbi, *Metaheuristics: From Design to Implementation*, John Wiley & Sons, Inc., 2009, p. 500. ↑236, 241, 242
- [9] J. Park, and B.-I. Kim, "The school bus routing problem: A review", *European Journal of Operational Research*, vol. 202, no. 2, pp. 311-319, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.017> ↑236, 237, 238
- [10] W. Ellegood, S. Solomon, J. North, and J. Campbell, "School bus routing problem: Contemporary trends and research directions", *Omega*, vol. 95, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.03.014> ↑236, 237, 246
- [11] J. Riera-Ledesma, and J. J. Salazar-González, "A column generation approach for a school bus routing problem with resource constraints", *Computers and Operations Research*, vol. 40, no. 2, pp. 566-583, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.08.011> ↑236, 238, 239
- [12] R. Bowerman, B. Hall, and P. Calamai, "A multi-objective optimization approach to urban school bus routing: Formulation and solution method", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 29, no. 2, pp. 107-123, 1995. [https://doi.org/10.1016/0965-8564\(94\)E0006-U](https://doi.org/10.1016/0965-8564(94)E0006-U) ↑236, 238
- [13] P. Schittekat, J. Kinable, K. Sörensen, M. Sevaux, F. Spieksma, and J. Springael, "A metaheuristic [1]for the school bus routing problem with bus stop selection", *European Journal of Operational Research*, vol. 229, no. 2, pp. 518-528, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.02.025> ↑236, 237, 238, 239, 241, 246, 247, 248
- [14] X. Chen, Y. Kong, L. Dang, Y. Hou, and X. Ye, "Exact and metaheuristic approaches for a bi-objective school bus scheduling problem", *Plos One*, vol. 10, no. 7, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132600> ↑237, 239
- [15] M. Spada, M. Bierlaire, and T. M. Liebling, "Decision-aiding methodology for the school bus routing and scheduling problem", *Transportation Science*, vol. 39, no. 4, pp. 443-556, 2005. <https://doi.org/10.1287/trsc.1040.0096> ↑237
- [16] D.-S. Chen, H. A. Kallsen, H.-C. Chen, and V.-C. Tseng, "A bus routing system for rural school districts", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 19, no. 1-4, pp. 322-325, 1990. [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(90\)90131-5](https://doi.org/10.1016/0360-8352(90)90131-5) ↑238
- [17] J. Kinable, F. Spieksma, and G. Vanden, "School bus routing: a column generation approach", *International Transactions in Operational Research*, vol. 21, no. 3, pp. 453-478, 2014. <https://doi.org/10.1111/itor.12080> ↑238
- [18] S. Ezquerro, J. Moura, Á. Ibeas, and J. Benavente, "Optimization model for school transportation design based on economic and social efficiency", *Transport Policy*, vol. 67, pp. 93-101, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.01.015> ↑238, 239
- [19] H. Caceres, R. Batta, and Q. He, "School bus routing with stochastic demand and duration constraints", *Transportation Science*, vol. 51, no. 4, pp. 1031-1386, 2017. <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0721> ↑238, 239
- [20] F. de Souza Lima, D. Pereira, S. da Conceição, and R. Camargo, "A multi-objective capacitated rural school bus routing problem with heterogeneous fleet and mixed loads", *4OR-A Quarterly Journal of Operations Research*, vol. 15, pp. 359-386, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10288-017-0340-8> ↑238, 239, 245
- [21] J. Pacheco, and R. Martí, "Tabu search for a multi-objective routing problem", *Journal of the Operational Research Society*, vol. 57, no. 1, 2006. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601917> ↑239
- [22] A. Corberán, E. Fernández, M. Laguna, and R. Martí, "Heuristic solutions to the problem of routing school buses with multiple objectives", *Journal of Operational Research Society*, vol. 53, no. 4, 2002. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601324> ↑239
- [23] L. Sales, C. Sousa, T. de Oliveira, and B. Athayde, "Memetic algorithm for the heterogeneous fleet school bus

- routing problem”, *Journal of Urban Planning Development*, vol. 144, no. 2, 2018. ↑239
- [24] J. Braca, J. Bramel, B. Posner, and D. Simchi-Levi, “A computerized approach to the New York City-school bus routing problem”, *IIE Transactions*, vol. 29, pp. 693-702, 1997. <https://doi.org/10.1023/A:1018526202990> ↑239
- [25] G. Astorga, B. Crawford, R. Soto, E. Monfroy, J. García y E. Cortés, “Un enfoque de meta- optimización para resolver el problema de cobertura de conjunto”, *Ingeniería*, vol. 23, no. 3, pp. 274- 288, 2018. <https://doi.org/10.14483/23448393.13247> ↑241
- [26] J. Fajardo, “Soft Computing en problemas de optimización dinámicos”, Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Granada, 2016, <http://hdl.handle.net/10481/42206> ↑242, 245
- [27] R. Lewis, K. Smith-Miles, and K. Phillips, “The school bus routing problem: An analysis and algorithm”, Brankovic L., Ryan J., Smyth W. (eds), *Combinatorial Algorithm*, vol. 10765, Springer, pp. 287- 298, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78825-8_24 ↑245
- [28] E. Toro, A. Escobar, and M. Granada, “Literature review on the vehicle routing problem in the green transportation context”, *Luna Azul*, vol. 42, pp. 362-387, 2016. ↑245
- [29] D. H. Wolpert, and W. G. Macready, “No free lunch theorems for optimization”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 1, pp. 67-82, 1997. <https://doi.org/10.1109/4235.585893> ↑246
- [30] J. Derrac, S. García, D. Molina, and F. Herrera, “A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms”, *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 1, pp. 3-18, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2011.02.002> ↑247

Ana Camila Pérez Pérez

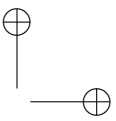
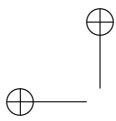
Estudiante de la Universidad Tecnológica de La Habana “José A. Echeverría”; Facultad de Ingeniería Informática.
Correo electrónico: 97.camila.p@gmail.com

Eduardo Sánchez Ansola

MSc. en Informática Aplicada por la Universidad Tecnológica de La Habana “José A. Echeverría”; Profesor Asistente de la Facultad de Ingeniería Informática.
Correo electrónico: esanchezansola@gmail.com

Alejandro Rosete Suárez

Dr. en Ciencias Técnicas (especialidad Informática) por la Universidad Tecnológica de La Habana “José A. Echeverría”; Profesor Titular de la Facultad de Ingeniería Informática.
Correo electrónico: alejandro.rosete.suarez@gmail.com



Research

Blurred Image Restoration Using a Regularized Linear Programming Model

Restauración de imágenes borrosas usando un modelo regularizado de programación lineal

José Fuentes ¹, Jorge Mauricio Ruiz V ^{*,1}

¹Departamento de Matemáticas, Universidad Nacional de Colombia

*Correspondence email: jmruizv@unal.edu.co

Received: 23-11-2020. Modified: 18-03-2021. Accepted: 26-03-2021

Abstract

Context: Minimization problems in the sense of least squares have constantly been used in the restoration of blurred images. They are characterized by their sensitivity to outliers, which significantly affects affecting the quality of the restored image relevantly. Since the L_1 -norm is less sensitive to outliers, the image deblurring problem is posed as a linear programming problem.

Method: An interior point method is used to solve the linear programming problem. This article presents the adaptation of regularization techniques of the image sought and its derivative to the problem of linear programming. A comparative study with other restoration methods under different types of image blurring is conducted.

Results: The proposed method leads to remarkable improvements in the recovered images. Numerical experiments show that the linear programming method works much better than those proposed in the literature, in terms of PSNR and SSIM values, as well as in the visual quality of the reconstructed images.

Conclusions: The regularized linear programming problem can be effectively used as a mathematical model of the image deblurring problem. For future work, there are plans to study of the automatic selection of regularization parameters and restoration solutions without prior knowledge of the blur kernel.

Keywords: Image restoration, inverse problems, linear programming, L_1 norm based regularization

Language: Spanish

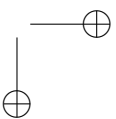
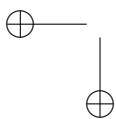
Open access



Cite this paper as: J. Fuentes, J. M. Ruiz V.: Restauración de imágenes borrosas usando un modelo regularizado de programación lineal. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 2, pp. 254-272 (2021).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

<https://doi.org/10.14483/23448393.17240>



Resumen

Contexto: Los problemas de minimización en el sentido de los mínimos cuadrados han sido constantemente usados en la restauración de imágenes borrosas. Estos se caracterizan por ser sensibles a valores atípicos afectando significativamente la calidad de la imagen restaurada. Teniendo en cuenta que la norma L_1 es menos sensible a datos atípicos, el problema de restauración de imágenes borrosas se plantea como un problema de programación lineal.

Método: Un método de punto interior se utiliza para la solución del problema de programación lineal. Se presenta la adaptación de técnicas de regularización al problema de programación lineal de la imagen buscada y su derivada. Se realiza un estudio comparativo con otras técnicas de restauración bajo diferentes tipos de difuminado de imágenes.

Resultados: Se probó que el método propuesto conduce a mejoras notables en las imágenes recuperadas. Los experimentos numéricos muestran que el método de programación lineal funciona mucho mejor que los propuestos en la literatura, en términos de valores de PSNR, SSIM y en la calidad visual de las imágenes reconstruidas.

Conclusiones: El problema de programación lineal regularizado puede utilizarse eficazmente como modelo matemático del problema de restauración de imágenes borrosas. Para trabajos futuros se plantea el estudio de la selección automática de parámetros de regularización y solución de restauración sin conocimiento previo del núcleo de difuminado.

Palabras clave: restauración de imágenes, problemas inversos, programación lineal, regularización en norma L_1

Idioma: Español.

1. Introducción

En el proceso de captura y registro de una imagen ocurren diversas anomalías que impiden una captura totalmente fiel de la realidad. Estas anomalías incluyen:

- Factores ambientales.
- Aquellas cosas que desean ser capturadas; por ejemplo, objetos en movimiento.
- Errores en los dispositivos de captura, elementos dañados o mal ajustados.
- Registro de la información.

Es muy común que estas imágenes no puedan ser tomadas de nuevo, lo que obliga a restaurarlas a su estado original para mejorar su nitidez antes de poder realizar otros pasos, como la detección, la segmentación, la clasificación [1]. En este sentido la restauración de imágenes juega un papel muy importante en áreas como: la tomografía computarizada [2], la tomografía de capacitancia y de impedancia eléctrica [3], el reconocimiento facial [4], la teledetección [5] y otras aplicaciones.

El problema de restauración de imágenes borrosas puede modelarse mediante la ecuación integral de Fredholm de primer tipo

$$B(s) = \int_G K(s-t)X(t)dt + E(s). \quad (1)$$

donde G es un dominio rectangular en \mathbb{R}^2 , $X(t) : G \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ representa la imagen original, $E(s)$ describe ruido aditivo y $B(s)$ es la imagen borrosa y ruidosa. La función $K(t)$ núcleo del operador integral especifica como los puntos de la imagen se difuminan y es llamada función de propagación puntual o PSF por sus siglas en inglés (point spread function) [6]. Por lo tanto, dados K y B el objetivo es encontrar una aproximación de X .

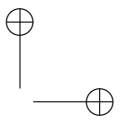
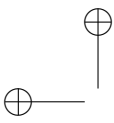
Es bien conocido que la ecuación integral (1) es un problema “mal propuesto”, es decir que pequeñas perturbaciones en los datos provocan grandes cambios en los resultados [7]. Para superar esta dificultad, se han propuesto diversas técnicas que tienen el propósito de encontrar una aproximación \tilde{X} de la imagen original X que solucione el problema de mínimos cuadrados

$$\text{mín} \left\| B(s) - \int_G K(s-t)\tilde{X}(t)dt \right\|_{L_2(G)}. \quad (2)$$

Teniendo en cuenta este objetivo, en [8] a partir del teorema de Bayes se construye un algoritmo iterativo de deconvolución de máxima verosimilitud con un núcleo K predefinido; dicho algoritmo recibe el nombre de método de deconvolución de Lucy-Richardson [9]. También se ha propuesto usar la transformada de Fourier para multiplicar por un núcleo inverso en el dominio de la frecuencia, como se ilustra en [10] y [11]. Un método similar al método de Lucy-Richardson se presenta en [1] y [12], el filtro de Winner, en el cual se asume que la imagen borrosa es producto de una convolución con un núcleo K añadiendo ruido aditivo y busca minimizar el error cuadrático medio de este modelo con la imagen borrosa. En [13] se agregan términos adicionales al modelo para garantizar ciertas condiciones sobre el núcleo de convolución K y la solución a este problema. En [14] y [6] se usa el método de regularización de Tikhonov, planteando un error cuadrático y penalizando la norma de la solución con una constante $\alpha > 0$, llamada parámetro de regularización. De manera similar a [6] en [15] se efectúa un proceso de regularización sobre la solución, salvo que el núcleo de convolución K y el cociente $\frac{\|x\|_{L_1}}{\|x\|_{L_2}}$ son los términos regularizados.

A diferencia de los trabajos mencionados, en este artículo consideramos el problema de minimización (2) en la norma L_1 en vez de la norma L_2 , esto implica que la solución es menos sensible a valores atípicos u observaciones anormales que ocurren en el proceso de difuminado de la imagen. Este enfoque fue propuesto en [16] y posteriormente desarrollado en [17] y [18], donde el problema de restauración es visto como un problema de programación lineal (PL) y resuelto con el método Simplex, el cual no es eficiente al considerar problemas de gran tamaño [19] y las imágenes restauradas son ruidosas. El objetivo central de este trabajo es precisamente superar estas limitaciones, para ello se emplea un método de punto interior (ver [20]) en la solución del problema de programación lineal y se usan técnicas de regularización numérica que permitan recuperar eficientemente imágenes más limpias. Además se realiza un estudio comparativo vía experimentación numérica de los métodos propuestos con los estudiados en la literatura.

El artículo está organizado como sigue. En la sección 2 se presenta el planteamiento del problema de restauración de imágenes borrosas como un problema de programación lineal y se comparan los métodos Simplex y de punto interior en el proceso de restauración. En la sección 3 se adapta la técnica de regularización como un problema de PL. Los experimentos numéricos se encuentran en la sección 4. Por último, se exponen las conclusiones.



2. Restauración de imágenes como un problema de PL

En problemas reales, las imágenes son capturadas solamente en puntos discretos dispuestos en un arreglo rectangular, cada uno de estos es denominado píxel. Por lo tanto, en la práctica se trabaja con la semidiscretización de (1)

$$B(s_i) = \int_G K(s_i - t)X(t)dt + E(s_i), \quad i = 1, \dots, N, \quad (3)$$

donde N es el número de píxeles en la imagen observada. Considerando que la imagen a encontrar $X(t)$ tiene las mismas dimensiones y es discretizada de la misma forma que la imagen borrosa, las integrales en (3) se discretizan en cada uno de los píxeles mediante la siguiente regla de cuadratura del punto medio:

$$B(s_i) = \sum_{j=1}^N K(s_i - t_j)X(t_j)\Delta t_j + E(s_i), \quad i = 1, \dots, N. \quad (4)$$

Donde tanto la distancia horizontal como la vertical entre los píxeles es de 1, por lo que $\Delta t_j = 1$ para cada $j = 1, \dots, N$. Ahora bien, si se consideran la matriz A cuyas entradas están dadas por $A_{ij} = K(s_i - t_j)$, los vectores $x = (X(t_1), \dots, X(t_N))^T$ y $b = (B(s_1) - E(s_1), \dots, B(s_N) - E(s_N))^T$, la ecuación (4) se convierte en el sistema de ecuaciones:

$$b = Ax. \quad (5)$$

A pesar de la apariencia simple del sistema de ecuaciones (5), este es un problema mal condicionado, es decir, su solución x es muy sensible a pequeños cambios en el vector b (ver [6] y [21]). Esta característica, proviene del hecho de que el problema (5) es la discretización de la ecuación integral (1). Por lo tanto, una “buena” solución es aquella que minimiza el error residual $e := Ax - b$. Teniendo esto en cuenta, se propone el siguiente problema de minimización:

$$\begin{aligned} \min_{e \in \mathbb{R}^N} \quad & \|e\|_1 \\ \text{Sujeto a:} \quad & Ax - b = e \\ & x \geq 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Donde, $x \geq y$ para dos vectores $x, y \in \mathbb{R}^N$ si $x_i \geq y_i$ para cada $i = 1, \dots, N$.

Para aclarar la notación e identificar cuáles son las variables, los coeficientes y hacer notoria la cantidad de restricciones, se hacen las siguientes definiciones:

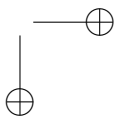
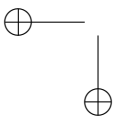
- $N = nm$, donde la imagen es una matriz de n filas y m columnas.
- El vector e es descompuesto en su parte positiva e^+ y su parte negativa e^- , esto es, $e = e^+ + e^-$. Definidos como:

$$e_i^+ = \max\{0, e_i\}, \quad e_i^- = \max\{0, -e_i\}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (7)$$

- El vector

$$f = (x_1, \dots, x_N, e_1^+, \dots, e_N^+, e_1^-, \dots, e_N^-)^T \quad (8)$$

con $f \in \mathbb{R}^{3N}$ es la concatenación de la imagen, la parte positiva del error y la parte negativa del error.



- $H \in \mathbb{R}^{N \times 3N}$ es una matriz por bloques definida así:

$$H = \begin{bmatrix} A_{N \times N} & I_{N \times N} & -I_{N \times N} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

- $c \in \mathbb{R}^{3N}$ es el vector de “costos” y se define como:

$$c = (\underbrace{0, \dots, 0}_{N \text{ ceros}}, \underbrace{1, \dots, 1}_{2N \text{ unos}})^T. \quad (10)$$

Con esta nueva notación puede escribirse el problema (6) como un problema de PL en su forma canónica:

$$\begin{aligned} \min_{f \in \mathbb{R}^{3N}} \quad & c^T f \\ \text{Sujeto a:} \quad & Hf = b \\ & f \geq 0. \end{aligned} \quad (11)$$

2.1. Resultados usando el modelo de PL

A continuación se presentan algunos resultados obtenidos al degradar imágenes y restaurarlas solucionando el problema de PL (11) mediante un método de punto interior [20]. Para evaluar la calidad de las restauraciones se usan las medidas de Proporción Máxima de Señal a Ruido (PSNR), el Índice de similitud estructural (SSIM) y el error relativo en la norma L_1 . (Para las definiciones de las métricas, véase el Apéndice A). Los experimentos presentados en este artículo fueron implementados en MATLAB y ejecutados en un computador con un procesador Intel R CoreTM i5 8250u 1, 60-3, 40 Ghz con una memoria RAM de 4 Gb. Las imágenes y el código fuente usado en este trabajo pueden ser consultados en la siguiente dirección URL:

<https://github.com/Xioeng/Restauracion-de-imagenes>

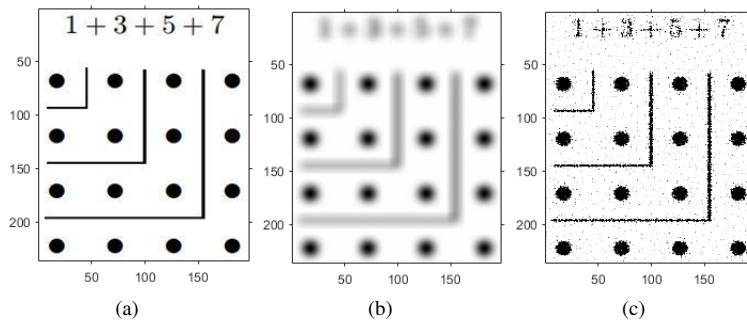


Figura 1. (Imagen degradada con 0,1% de ruido y su restauración, tomado de [22]). (a) Imagen original, (b) Imagen borrosa, (c) Imagen restaurada.

En la figura 1, la imagen (c) muestra el resultado de aplicar el método de restauración de programación lineal a la imagen borrosa (b), la cual se obtuvo mediante la degradación de la imagen (a) de 236×197 píxeles por una PSF exponencial de tamaño 15×15 , varianza de 16 y contaminada con un ruido blanco de 0,1 %. Se observa que la imagen restaurada (c) es legible a pesar de la presencia de ruido del tipo “sal y pimienta”.

Tabla I. Resultados de la restauración de la imagen de la Figura 1.

	Imagen borrosa	Imagen restaurada
Error rel.	9,45 %	4,62 %
PSNR	15,76 dB	18,46 dB
SSIM	0,606	0,522

La tabla I muestra la diferencia entre la imagen de referencia (a) y las imágenes borrosas (b) y restaurada (c) respectivamente. Se observa la mejora en calidad, de la imagen restaurada en términos de las medidas PSNR, SSIM y el error relativo. No obstante, no debe esperarse que los errores al final de la restauración sean pequeños, debido a los grandes números de condición que presentan estas matrices; por ejemplo para la restauración de la imagen figura 1 (a), la condición de la matriz A es $Cond_2(A) = 3,66 \times 10^7$.

2.2. El algoritmo Simplex contra el algoritmo de punto interior

Un segundo experimento se ilustra en la Figura 2, en el que se evalúan y comparan los algoritmos Simplex y de punto interior en el proceso de restauración. A la imagen (a) de tamaño 194×259 se le aplica una PSF de desenfoque de movimiento horizontal de tamaño 51×51 y un 0,5 % de ruido.

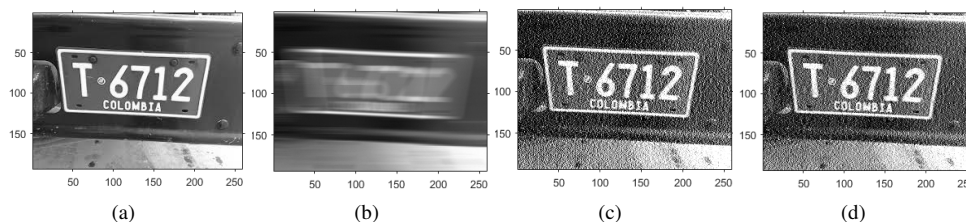


Figura 2. Imagen degradada con 0,5 % de ruido y sus restauraciones. (a) Imagen original. Tomado de [23], (b) Imagen borrosa, (c) Imagen restaurada con el método Simplex, (d) Imagen restaurada con el método de punto interior.

En la figura 2 se aprecia que la imagen restaurada con el método de punto interior (d) es menos ruidosa encima de la placa que en la imagen restaurada por el método Simplex (c). Esta zona corresponde a una región homogénea y dicho efecto se ve reflejado en la medida Err. Sin embargo, los errores en cada uno de los píxeles son más grandes, como se observa en las medidas PSNR y SSIM (ver tabla II), esto se debe a lo mal condicionado del problema tratado $Cond_2(A) = 6,77 \times 10^3$.

También se encuentra que las soluciones obtenidas por los métodos de punto interior y Simplex son notoriamente diferentes, empezando por la cantidad de componentes no nulas; la menor cantidad es para el método Simplex, esto es de esperarse pues en este algoritmo las soluciones son

soluciones básicas que constan de bastantes ceros. Cuantificando esta diferencia, se tiene que la norma $\|\cdot\|_1$ de la diferencia de las soluciones es $1,08 \times 10^6$, lo que es equivalente al 20 % de la norma $\|\cdot\|_1$ de la imagen original, luego estas soluciones aunque se parecen visualmente son bastante lejanas. En cuanto al tiempo de cómputo, la restauración de la imagen figura 2 (a) mediante el método Simplex tardó 66,6 segundos, mientras que el método de punto interior necesitó solo 8,7 segundos.

Tabla II. Resultados de las restauraciones de la imagen de la Figura 2.

	Imagen borrosa	Simplex	Punto interior
Tiempo	—	66,6 Seg.	8,7 Seg.
Número de iteraciones	—	67618	18
Norma $\ \cdot\ _1$	$5,619 \times 10^6$	$5,619 \times 10^6$	$5,619 \times 10^6$
Componentes no nulas	50246	44719	50246
Err	16 %	37,99 %	36,79 %
PSNR	17,99 dB	15,25 dB	13,53 dB
SSIM	0,673	0,278	0,239

3. Modelo regularizado como un problema de PL

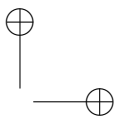
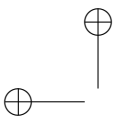
Con el objetivo de mejorar los resultados de la sección anterior, es decir, reducir el ruido y lograr imágenes restauradas más homogéneas, adaptamos técnicas de regularización al modelo de programación lineal. Además, puesto que las imágenes poseen cierto rango de valores: $[0, 255]$ en el caso usual, aunque también suelen verse en el rango $[0, 1]$. Consideramos las restricciones de no negatividad en restricciones de caja, esto es, cambiar la desigualdad $0 \leq x$ a la desigualdad $0 \leq x \leq u$ donde $0 \leq u \in \mathbb{R}^N$ es un vector de las mismas dimensiones que x y actúa como cota superior de la solución óptima.

El problema (6) al añadir los términos de regularización y las restricciones resulta:

$$\begin{aligned}
 P(\alpha, \gamma) : \quad & \min_{e, x \in \mathbb{R}^N} \|e\|_1 + \alpha \|x\|_1 + \gamma \|\nabla x\|_1 \\
 \text{Sujeto a:} \quad & Ax - b = e \\
 & 0 \leq x \leq u.
 \end{aligned} \tag{12}$$

donde $\|b - Ax\|_1$ es la función objetivo subyacente y los términos de regularización son $\alpha \|x\|_1$ y $\gamma \|\nabla x\|_1$ con $\alpha, \gamma > 0$. Los efectos que tienen los términos de regularización en el problema de restauración son los siguientes:

- Como A es una matriz mal condicionada, la adición del término $\|x\|_1$ busca mantener x de un tamaño razonable y el error residual $\|b - Ax\|_1$ lo más pequeño posible. Esto remedia el problema de la aparición de píxeles con grandes valores que entorpezcan el proceso de restauración y controla también la cantidad de ceros en la imagen.
- Para tratar los casos en los que hay muchas variaciones de intensidad de la imagen se introduce el término $\|\nabla x\|_1$, el cual penaliza soluciones no suaves. Es decir, se limitan las altas frecuencias para obtener una imagen relativamente homogénea.



- Para obtener una imagen lo más fiel posible a la original, los parámetros de regularización α y γ se seleccionan para alcanzar un balance entre las normas del error residual, la solución y su derivada.

En lo que sigue se transforma el problema (12) como un problema de programación lineal en forma estándar.

3.1. Abordaje

Para este propósito se usan los siguientes hechos:

1. Se puede observar que el vector x tiene componentes no negativas, entonces:

$$\|x\|_1 = \sum_{i=0}^N |x_i| = \sum_{i=0}^N x_i, \quad (13)$$

es decir, es posible obviar los valores absolutos y obtener la suma de las componentes del vector x .

2. Se puede notar que:

$$\|\nabla x\|_1 = \left\| \left(\frac{\partial x}{\partial x_1}, \frac{\partial x}{\partial x_2} \right) \right\|_1 = \left\| \frac{\partial x}{\partial x_1} \right\|_1 + \left\| \frac{\partial x}{\partial x_2} \right\|_1. \quad (14)$$

Es decir, se pueden separar las derivadas en la dirección horizontal y vertical de la imagen. De hecho, pueden ser calculadas de forma similar a como se calculó la matriz A . Las derivadas parciales son transformaciones lineales. Gracias a esto, se pueden calcular las matrices D_h y D_v , de forma que $\frac{\partial x}{\partial x_1} = D_h x$ y que $\frac{\partial x}{\partial x_2} = D_v x$. Esto permite que

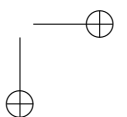
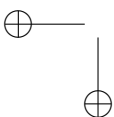
$$\|\nabla x\|_1 = \|D_h x\|_1 + \|D_v x\|_1. \quad (15)$$

3. Al igual que en la ecuación (6), se escribe $\|b - Ax\|_1 = e^+ - e^-$ con $e^+ \geq 0$ y $e^- \geq 0$. También, se separan los términos de las derivadas parciales en los vectores $h^+ \geq 0$, $h^- \geq 0$, $v^+ \geq 0$ y $v^- \geq 0$, de forma que

$$D_h x = h^+ - h^- \quad y \quad D_v x = v^+ - v^-. \quad (16)$$

4. Al limitar los posibles valores de la norma de la solución a un cierto rango, se obliga a que los valores de los vectores error e^+ , e^- , h^+ , h^- , v^+ y v^- estén en el mismo rango. Esto se debe a que si a , b y $c > 0$ son tres números reales con $a, b \in [0, c]$, entonces, $|a - b| \in [0, c]$.

Con todas estas observaciones se puede reescribir el problema de optimización de la ecuación (12) en términos de los problemas de optimización asociados a las constantes α y γ . Para ello, se hacen las siguientes definiciones:



- El vector de variables $f \in \mathbb{R}^{7N}$ se define como:

$$f = (x_1, \dots, x_N, e_1^+, \dots, e_N^+, e_1^-, \dots, e_N^-, h_1^+, \dots, h_N^+, h_1^-, \dots, h_N^-, v_1^+, \dots, v_N^+, v_1^-, \dots, v_N^-)^T. \quad (17)$$

Este vector es la concatenación de la imagen, la parte positiva del error y la parte negativa del error del modelo de borrado, la parte positiva y la parte negativa de las derivadas parciales.

- $H \in \mathbb{R}^{3N \times 7N}$ es una matriz por bloques definida así:

$$H = \begin{bmatrix} A & I & -I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_h & 0 & 0 & -I & I & 0 & 0 \\ D_v & 0 & 0 & 0 & 0 & -I & I \end{bmatrix}, \quad (18)$$

donde cada matriz es de tamaño $N \times N$; la matriz I es la matriz identidad y la matriz 0 es la matriz de ceros.

- $c \in \mathbb{R}^{7N}$ es el vector de “costos” y se define como:

$$c = (\underbrace{\alpha, \dots, \alpha}_{N \text{ alfas}}, \underbrace{1, \dots, 1}_{2N \text{ unos}}, \underbrace{\gamma, \dots, \gamma}_{4N \text{ gammas}})^T. \quad (19)$$

- Se define el vector $d \in \mathbb{R}^{3N}$ como:

$$d = (b^T, \underbrace{0, \dots, 0}_{2N \text{ ceros}})^T, \quad (20)$$

donde las componentes del vector b son las intensidades de los píxeles de la imagen borrosa.

- El vector $u \in \mathbb{R}^{7N}$ se construye de forma que $u = 255 \cdot \mathbf{1}$. Con $\mathbf{1}$ el vector de unos en \mathbb{R}^{7N} .

Así, la familia de problemas descritos por la ecuación (12) puede reescribirse como el problema de programación lineal

$$\begin{aligned} P(\alpha, \gamma) : \quad & \min_{f \in \mathbb{R}^{7N}} c^T f \\ \text{Sujeto a:} \quad & Hf = d \\ & 0 \leq f \leq u. \end{aligned} \quad (21)$$

Nótese que cuando $\alpha = \gamma = 0$ es el caso del modelo sin regularizar.

4. Resultados: modelo regularizado

En esta sección se presenta el resultado de emplear el método de punto interior en la solución del problema de PL (21). La restauración se realiza a imágenes degradadas con diferentes funciones PSF y con distintos niveles de ruido.

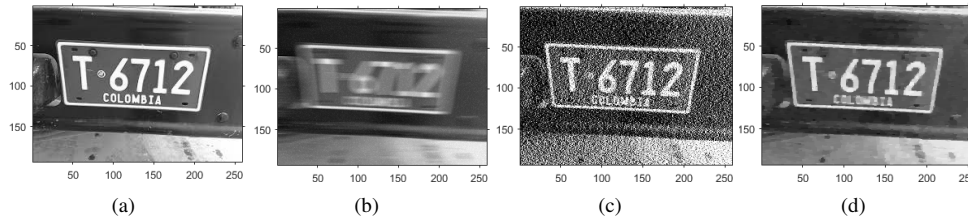


Figura 3. Imagen degradada con 5 % de ruido y sus restauraciones usando el algoritmo de punto interior. (a) Imagen original, (b) Imagen borrosa, (c) Imagen restaurada con el modelo sin regularizar, (d) Imagen restaurada con el modelo regularizado.

En la figura 3, la imagen (a) es degradada mediante una PSF de movimiento horizontal de tamaño 21×21 y a la imagen borrosa se le añadió 5 % de ruido. Se usaron los parámetros de regularización $\alpha = 2 \times 10^{-2}$ y $\gamma = 8 \times 10^{-2}$. Se observa que varias de las zonas que son homogéneas en la imagen original (a) son contaminadas con ruido en la imagen no regularizada (b). Sin embargo, en la imagen regularizada (d) es posible volverlas homogéneas de nuevo. También se observa que no se regularizó demasiado la derivada para no perder ciertos detalles de la imagen (como lo son los tornillos y pernos en la placa y cerca de ella). Por otra parte, hay que tener cuidado de no regularizar demasiado la derivada ya que detalles importantes como lo puede ser la palabra “Colombia” pueden verse afectados.

Tabla III. Comparación de la calidad las restauraciones de la imagen de la Figura 3.

	Imagen borrosa	Regularizado	Sin regularizar
Error rel.	15 %	7,9 %	49,14 %
PSNR	19,77 dB	26,37 dB	12,43 dB
SSIM	0,640	0,840	0,170

En la figura 4, la imagen (a) de tamaño 255×271 píxeles es degradada con una PSF exponencial con varianza de 16, un coeficiente $q = 3$ y de tamaño 11×11 . Esta imagen fue contaminada con 0,5 % de ruido. Se usaron los parámetros de regularización $\alpha = 1 \times 10^{-2}$ y $\gamma = 2,5 \times 10^{-2}$.

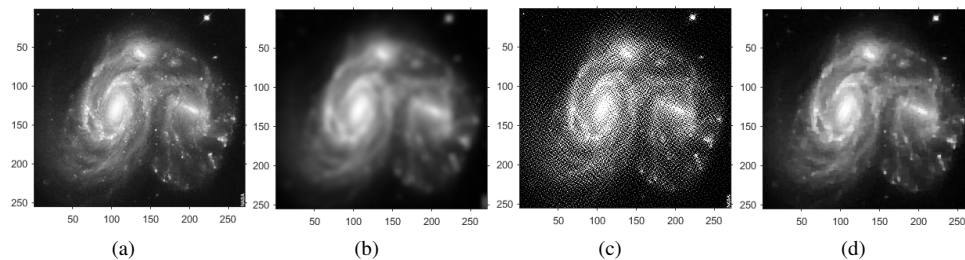


Figura 4. Imagen degradada con 0,5 % de ruido y sus restauraciones usando el algoritmo de punto interior. Tomado de [24]. (a) Imagen original, (b) Imagen borrosa, (c) Imagen restaurada con el modelo sin regularizar, (d) Imagen restaurada con el modelo regularizado.

En la imagen figura 4 (d) se observa que al regularizar la norma y su derivada se evita la aparición

del ruido artificial que se aprecia en la imagen que no fue regularizada (figura 4 (c)), esto permite recuperar zonas que verdaderamente son homogéneas, al igual que el caso anterior. Sin embargo, dada la naturaleza de la imagen, en la que se presentan varios detalles que pueden ser interpretados como ruido (los puntos blancos que son polvo estelar o estrellas), es necesario regularizar menos la derivada de la solución para no eliminarlos. En este ejemplo, se observa que es indispensable un compromiso entre la cantidad de ruido admisible y la cantidad de detalles permitidos que puedan parecer ruido, esto se refleja en la selección de los parámetros de regularización α y γ .

Tabla IV. Comparación de la calidad las restauraciones de la imagen de la Figura 4.

	Imagen borrosa	Regularizado	Sin regularizar
error rel	9,39 %	7,50 %	81,43 %
PSNR	27,58 dB	31,06 dB	11,51 dB
SSIM	0,738	0,813	0,079

En las tablas III y IV se compara la calidad de las imágenes restauradas obtenidas de solucionar el problema de PL (11) y el problema de PL regularizado (21). Como podemos ver, aplicar la técnica regularización propuesta da un mejor resultado de restauración en las tres métricas.

4.1. Comparación contra otros métodos de restauración

En esta sección se estudia el desempeño de nuestra propuesta con respecto a los siguientes métodos formulados por otros autores:

1. Método de deconvolución de Lucy-Richardson propuesto en [8].
2. Método de deconvolución de Wiener propuesto en [1].
3. Método *blind deconvolution* desarrollado en [25] y [26].
4. Algoritmo propuesto en [15] llamado “Blind Deconvolution Using a Normalized Sparsity Measure” (BDNSM).
5. Método de regularización de Tikhonov desarrollado en [27] y [6].
6. Método propuesto en el que se usa PL.

La implementación de estos métodos como: el algoritmo de Lucy-Richardson, el algoritmo de Wiener y el algoritmo de *blind deconvolution* son funciones implementadas por defecto en MATLAB. La implementación del algoritmo (BDNSM) fue tomada de la web del autor [28] y la implementación del método de regularización de Tikhonov fue tomada del sitio web de los autores [29].

A continuación se presentan varios experimentos de restauración a diversos tipos de imágenes [30] con diferentes tipos de PSF, así como los resultados cuantitativos de dichas restauraciones (ver Tabla V). Para cada uno de los experimentos todos los algoritmos fueron provistos con la misma PSF y fueron usados con los parámetros que tienen por defecto. Para los casos de los métodos de regularización de Tikhonov y el propuesto se usó el mismo valor de α para ambos.

4.1.1. Experimento 1

En la figura 5 se presenta el estudio comparativo. Inicialmente se desenfoca la imagen (a) usando una PSF de movimiento vertical de tamaño 31×31 y luego contaminada con 3% de ruido blanco. Para la restauración se usaron los valores de parámetros $\alpha = 1 \times 10^{-2}$ y $\gamma = 7 \times 10^{-2}$. En la figura 5(h) se observa la efectividad del modelo propuesto al restaurar imágenes con regiones homogéneas, como se ha visto antes. En los otros métodos tienden a aparecer líneas horizontales que originalmente no estaban en la imagen, esto puede ser visto como ruido adicional en la imagen. En particular, las restauraciones logradas con los métodos de Wiener figura 5(d) y de regularización de Tikhonov figura 5(g) contienen muchos puntos blancos (el ruido del que se habló en la sección 2.1). Esto puede deberse tanto a la ausencia de la regularización en la derivada, como a la norma usada en la optimización que se realiza en estas dos técnicas.

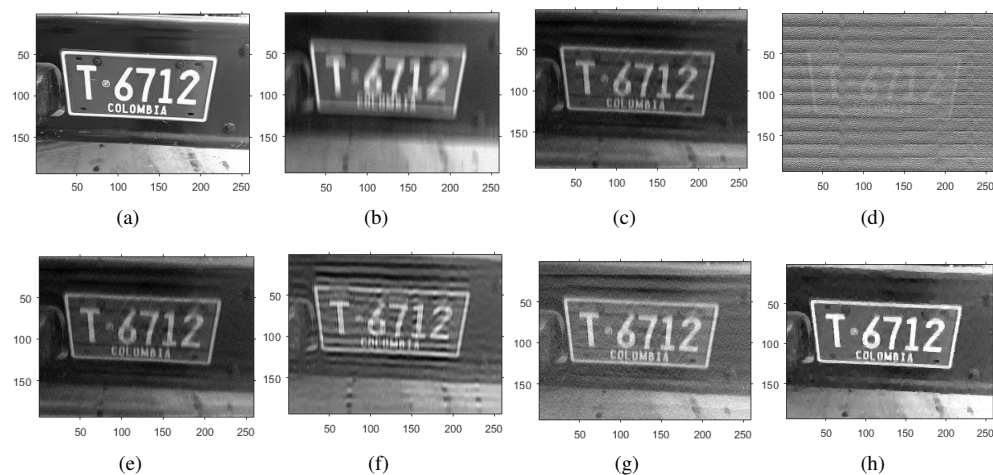


Figura 5. Imagen degradada con 3% de ruido y sus restauraciones. (a) Imagen original, (b) Imagen borrosa, (c) Imagen restaurada con método de Lucy-Richardson, (d) Imagen restaurada con método de deconvolución de Wiener, (e) Imagen restaurada con el método *blind deconvolution*, (f) Imagen restaurada con método BDNSM, (g) Imagen restaurada con método de regularización de Tikhonov, (h) Imagen restaurada con método propuesto.

4.1.2. Experimento 2

En este experimento se difumina la imagen original figura 6(a) mediante una PSF exponencial con varianza igual a 7 y luego es contaminada con un ruido blanco del 1%. En la figura 6 se aprecia que las restauraciones de los diferentes métodos apuntan a recuperar los detalles generales de la imagen, aunque en algunas de ellas (figura 6 (d), (e) y (f)) se nota aún la presencia de efectos borrosos sobre esta. En cambio, el método propuesto restaura con mayor nitidez características locales de la imagen, por ejemplo: el portarretratos y los números del reloj (ver figura 6(h)).

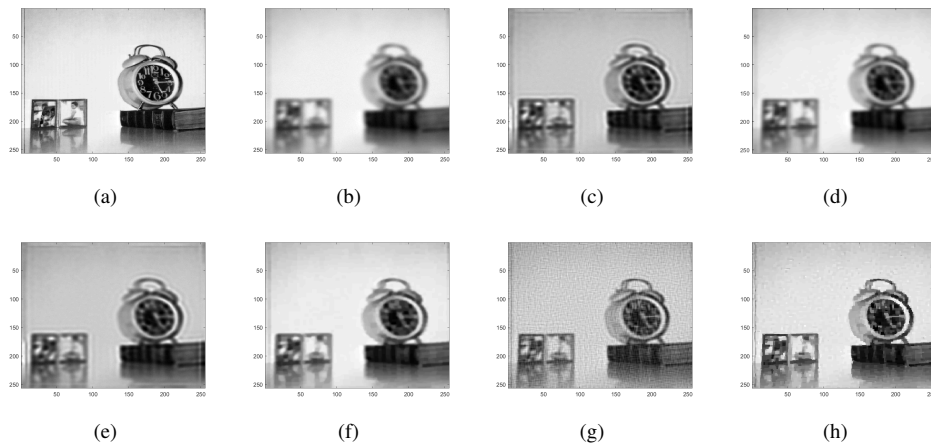


Figura 6. Imagen degradada con 1% de ruido y sus restauraciones. (a) Imagen original, (b) Imagen borrosa, (c) Imagen restaurada con método de Lucy-Richardson, (d) Imagen restaurada con método de deconvolución de Wiener, (e) Imagen restaurada con el método *blind deconvolution*, (f) Imagen restaurada con método BDNSM, (g) Imagen restaurada con método de regularización de Tikhonov, (h) Imagen restaurada con método propuesto.

4.1.3. Experimento 3.

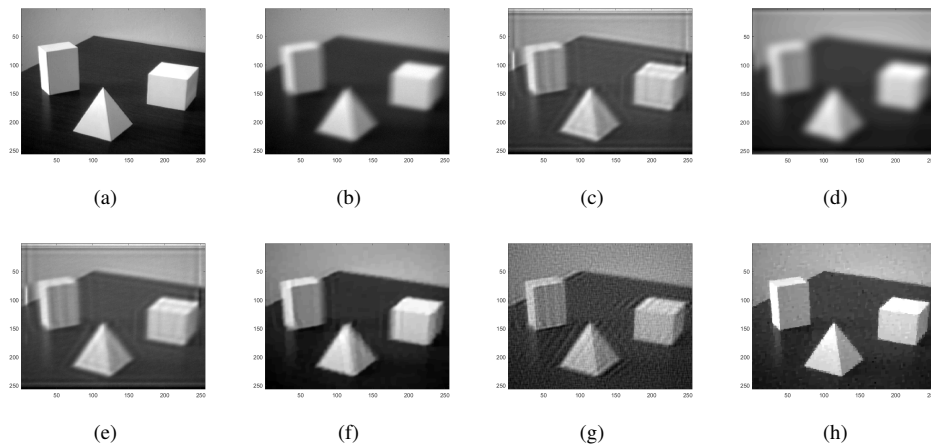


Figura 7. Imagen degradada con una PSF de degradado atmosférico, 1% de ruido y sus restauraciones. (a) Imagen original, (b) Imagen borrosa, (c) Imagen restaurada con método de Lucy-Richardson, (d) Imagen restaurada con método de deconvolución de Wiener, (e) Imagen restaurada con el método *blind deconvolution*, (f) Imagen restaurada con método BDNSM, (g) Imagen restaurada con método de regularización de Tikhonov, (h) Imagen restaurada con método propuesto.

La imagen de la figura 7(b) ha sido generada por la convolución de la imagen original (figura 7(a)), con una PSF de degradado atmosférico y la adición de un ruido blanco del 1%. Se aprecia en

la imagen de la figura 7(h) cómo el método propuesto recupera los bordes de las figuras geométricas, evitando que aparezcan líneas de contorno alrededor de ellas o ruido en el fondo de la imagen, a diferencia de lo que se observa en las imágenes 7 (c), (e) y (g). Se nota que el método de Wiener no arroja resultados satisfactorios, esto debido a su sensibilidad con respecto al ruido de fondo.

4.1.4. Experimento 4

En este experimento se restaura la imagen borrosa 8(b) la cual se obtuvo al aplicar un PSF de desenfoque y un ruido blanco del 1% a la imagen 8(a). Observamos una mejor calidad de reconstrucción al emplear el método propuesto (figura 8(h)). Se recuperan los caracteres degradados evitando, de nuevo, que haya ruido que degrade el fondo. Este efecto es resultado de penalizar la norma $\|x\|_1$.

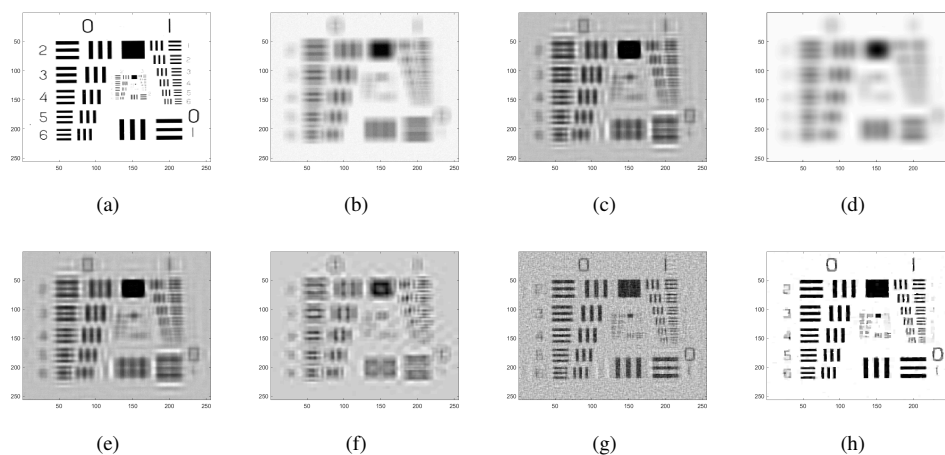


Figura 8. Imagen degradada con una PSF de desenfoque, 1% de ruido y sus restauraciones. (a) Imagen original, (b) Imagen borrosa, (c) Imagen restaurada con método de Lucy-Richardson, (d) Imagen restaurada con método de deconvolución de Wiener, (e) Imagen restaurada con el método *blind deconvolution*, (f) Imagen restaurada con método BDNSM, (g) Imagen restaurada con método de regularización de Tikhonov, (h) Imagen restaurada con método propuesto.

4.1.5. Experimento 5

A continuación se presenta una imagen de resonancia magnética (figura 9(a)) que fue alterada mediante una PSF de movimiento en una dirección de 300 grados de tamaño 31×31 y contaminada con ruido blanco del 1%. En la figura 9(h) se aprecia el potencial del método propuesto en el procesamiento de imágenes médicas. Se recupera la imagen manteniendo los detalles de la misma sin añadir ruido al fondo, el cual podría ser nocivo para un posprocesamiento. Además, se restaura la escala de grises con mayor fidelidad que la de las otras técnicas.

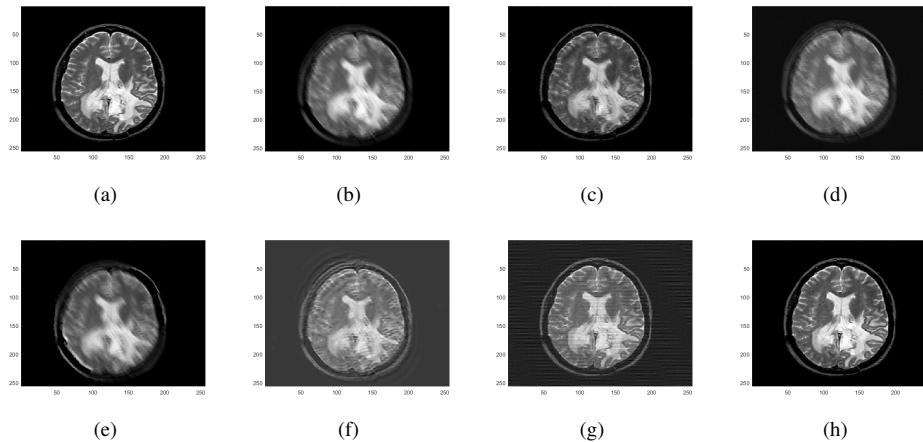
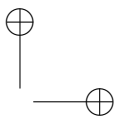
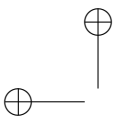


Figura 9. Imagen degradada con una PSF de movimiento, 1% de ruido y sus restauraciones. (a) Imagen original, (b) Imagen borrosa, (c) Imagen restaurada con método de Lucy-Richardson, (d) Imagen restaurada con método de deconvolución de Wiener, (e) Imagen restaurada con el método *blind deconvolution*, (f) Imagen restaurada con método BDSNM, (g) Imagen restaurada con método de regularización de Tikhonov, (h) Imagen restaurada con método propuesto.

Tabla V. Comparación de la calidad de las restauraciones de la imagen de las Figuras 6, 7, 8 y 9.

Imagen	Medida	Borrosa	R-Lucy	Wiener	Blind	BDSNM	Tikhonov	Propuesto
Placa	error rel	26,46 %	15,44 %	221,65 %	15,63 %	40,12 %	18,43 %	7,97 %
	SSIM	0,425	0,555	0,014	0,546	0,162	0,421	0,787
	PSNR (dB)	14,99	24,16	12,68	24,36	14,23	20,77	25,06
Reloj	error rel	4,93 %	4,47 %	50,04 %	4,47 %	5,90 %	5,78 %	3,46 %
	SSIM	0,765	0,782	0,6034	0,783	0,815	0,497	0,822
	PSNR (dB)	22,858	24,192	7,941	24,201	23,592	24,675	26,209
Figuras	error rel	4,65 %	6,09 %	50,00 %	5,98 %	5,11 %	7,61 %	2,63 %
	SSIM	0,839	0,770	0,675	0,774	0,886	0,436	0,872
	PSNR (dB)	26,624	25,188	10,667	25,198	27,873	25,758	32,354
Test	error rel	15,84 %	12,53 %	56,28 %	12,54 %	35,58 %	12,18 %	2,44 %
	SSIM	0,432	0,503	0,433	0,503	0,389	0,346	0,914
	PSNR (dB)	12,128	14,607	5,813	14,596	9,274	17,106	23,182
Resonancia	error rel	31,49 %	8,50 %	41,61 %	36,70 %	42,14 %	22,26 %	2,99 %
	SSIM	0,649	0,939	0,463	0,584	0,558	0,716	0,984
	PSNR (dB)	19,653	30,974	22,199	18,067	17,384	23,337	40,875

Una evaluación más objetiva de nuestro método se ilustra en la tabla V. En esta se presentan las medidas de error relativo, PSNR y SSIM de las imágenes restauradas por los diferentes métodos y los tipos de difuminado. Los mejores resultados están en negrita. Se puede observar que los valores de error relativo, PSNR y SSIM del método propuesto son superiores a los de otros métodos, excepto en el caso de la restauración de las figuras geométricas (figura 7) en el que el método de deconvolución ciega BDSNM muestra un mejor valor de SSIM. Esto se debe a que la eliminación



de ruido de fondo es mejor que la producida por el método propuesto (véase figura 7(f)). Por otra parte, es de recalcar que el método de PL con regularización contrarresta el efecto amplificador de los errores por el mal condicionamiento del problema de restauración. Obsérvese el error relativo de la última columna de la tabla V.

5. Conclusiones

Se exploró y se probó un método alternativo para la restauración de imágenes borrosas, visto y solucionado como un problema de programación lineal tomando en cuenta las propiedades particulares de la norma $\|\cdot\|_1$. La adaptación de la técnica de regularización en el problema de programación lineal, para tratar con el mal condicionamiento procedente de la ecuación integral (1) conduce a la obtención de resultados óptimos en la restauración de las imágenes difuminadas por diferentes funciones PSF. Es así, que la penalización de la solución en la norma L_1 reduce el ruido en las áreas homogéneas de la imagen y la penalización del gradiente permite preservar mejor los bordes de la imagen obteniendo mejores resultados que con otros métodos usualmente empleados en la literatura. Se observa que para obtener resultados óptimos en la restauración de las imágenes es necesario un criterio de selección de los parámetros de regularización α y γ que discrimine de la mejor manera los detalles de la imagen que pueden parecer ruido. En este trabajo no se consideraron imágenes de gran tamaño; sin embargo, en vista del rendimiento superior del método propuesto, puede ser interesante investigar el desempeño de otros esquemas numéricos para la solución de problemas de PL de gran tamaño, como una implementación basada en la actualización de soluciones básicas de Forrest-Tomlin [31] o métodos de búsqueda multidimensional [32]. Además, dado el carácter convexo del problema aquí tratando, es posible emplear métodos incrementales y de reducción de la varianza para el descenso del gradiente estocástico [33], especialmente usados en problemas de aprendizaje de máquina. Otro trabajo futuro es explorar la selección automática de parámetros de regularización y la incorporación de la estimación del núcleo de borrado en el marco de un problema de programación lineal.

A. Medidas cuantitativas de la calidad de la restauración

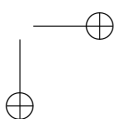
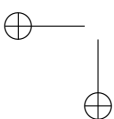
Para evaluar la calidad de las restauraciones se usan tres medidas, dos de ellas son muy usadas en la literatura correspondiente a imágenes. Sean I y R dos matrices que representan a dos imágenes en sus arreglos como píxeles y donde se busca medir que tanto se parece la imagen I a la imagen de referencia R :

- Proporción Máxima de Señal a Ruido (PSNR) por sus siglas en inglés (Peak Signal to Noise Ratio). Esta medida se basa en el error cuadrático medio (ECM), calculado como

$$ECM = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (I_{ij} - R_{ij})^2, \quad (22)$$

y tiene en cuenta el mayor valor de intensidad que puede tomar la imagen Max . Si se tienen b bits para representar la imagen entonces $Max = 2^b - 1$, y el PSNR se calcula como

$$PSNR(I, R) = 10 \log_{10} \left(\frac{Max^2}{ECM} \right) \text{dB}. \quad (23)$$



En este caso la calidad de la restauración es mejor a medida que $PSNR(I, R)$ se hace cada vez más grande.

- Índice de similitud estructural o SSIM por sus siglas en inglés (Structural Similarity Index): este índice evalúa la similitud entre dos imágenes, varía de cero a uno, donde uno significa que las imágenes son la misma y cero que las imágenes no tienen estructuras comunes (ver [34])

$$SSIM(I_m, Ref) = \frac{(2\mu_{I_m}\mu_{Ref} + c_1)(2\sigma_{I_m Ref} + c_2)}{(\mu_{I_m}^2 + \mu_{Ref}^2 + c_1)(\sigma_{I_m}^2 + \sigma_{Ref}^2 + c_2)}$$

donde:

- μ_{I_m} y μ_{Ref} son los promedios de las intensidades de I_m y Ref respectivamente.
 - $\sigma_{I_m}^2$ y σ_{Ref}^2 son las varianzas de las intensidades de I_m y Ref respectivamente.
 - $\sigma_{I_m Ref}$ es la covarianza de las intensidades de I_m y Ref .
 - c_1 y c_2 son parámetros de estabilización.
- Error relativo: en este caso se define

$$\|A\|_{F_1} := \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |a_{ij}|. \quad (24)$$

Donde A es una matriz de $n \times m$ y sus entradas están dadas por los números a_{ij} con $i = 1, \dots, n$ y $j = 1, \dots, m$. Entonces se define el error relativo como

$$Err(I, R) = 100 \frac{\|I - R\|_{F_1}}{\|R\|_{F_1}} \%. \quad (25)$$

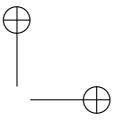
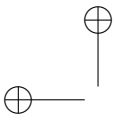
B. Agradecimientos

Los autores agradecen a los árbitros anónimos por sus valiosos comentarios y sugerencias que contribuyeron para mejorar el manuscrito.

Referencias

- [1] R. Gonzalez, R. Woods, and S. Eddins, *Digital Image Processing Using MATLAB*. McGraw Hill Education, 2013. 255, 256, 264
- [2] A. Zohair, and G. Sulong, “Deblurring computed tomography medical images using a novel amended landweber algorithm”, *Interdisciplinary Sciences: Computational Life Sciences*, 2, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12539-014-0225-x>. 255
- [3] J. Ye, H. Wang, and W. Yang, “Image recovery for electrical capacitance tomography based on low-rank decomposition”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 66, no. 7, pp. 1751-1759, 2017. <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2664458>. 255
- [4] Q. Qi, J. Guo, L. Jichanga, C. Li, and L. Xiao, “Blind face images deblurring with enhancement”, *Multimedia Tools and Applications*, vol. 80, no. 2, pp. 2975-2995, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-09460-x>. 255

- [5] W. Manwei, Z. Fuzhen, Z. Bing, and B. Yuyang, "An improved remote sensing image blind deblurring algorithm", *3rd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EIT-CE)*, pp. 667-670, 2019. <https://doi.org/10.1109/EITCE47263.2019.9094971>. 255
- [6] A. F. Montenegro, "Regularización de problemas inversos e imágenes borrosas", Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, mayo 2010. 256, 257, 264
- [7] S. Ray and P. Sahu, *Novel Methods for Solving Linear and Nonlinear Integral Equations*. Boca Raton, FL: Chapman and Hall/CRC, 2019. 256
- [8] W. Richardson, "Bayesian-based iterative method of image restoration", *JoSA*, vol. 62, no. 1, pp. 55-59, 1972. <https://doi.org/10.1364/JOSA.62.000055>. 256, 264
- [9] D. Liu, X. Chen, and X. Liu, "An improved richardson-lucy algorithm for star image deblurring", *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, pp. 1-5, 2019. <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2019.8826905>. 256
- [10] A. Buades, B. Coll, and J. Morel, "On image denoising methods", *tech. rep.*, Centre de Mathematiques et de Leurs Applications, 2004. 256
- [11] M. Chen, X. Zhang, M. Feng, and W. Xing, "Image deblurring method based on fourier transform", *6th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)*, pp. 1285-1289, 2019. <https://doi.org/10.1109/ICSAI48974.2019.9010430>. 256
- [12] C. Cai, A. Liu, and B. Zhang, "Motion deblurring from a single image", *IEEE 20th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*, pp. 406-410, 2016. <https://doi.org/10.1109/cscwd.2016.7566023>. 256
- [13] M. Jin, S. Roth, and P. Favaro, "Normalized blind deconvolution", *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pp. 668-684, 2018. 256
- [14] X. Yan, G. Jing, Y. Liu, Y. Hu, L. Zhou, C. Zhang, and X. Wang *Research of image deblurring based on Tikhonov regularization*, vol. 11023, pp. 12 - 21, 2019. <https://doi.org/10.1117/12.2515437>. 256
- [15] D. Krishnan, T. Tay, and R. Fergus, "Blind deconvolution using a normalized sparsity measure", *CVPR 2011*, pp. 233-240, 2011. 256, 264
- [16] D. MacAdam, "Digital image restoration by constrained deconvolution", *Journal of the Optical Society of America*, vol. 60, no. 12, pp. 1617-1628, 1970. <https://doi.org/10.1364/JOSA.60.001617>. 256
- [17] N. Mascarenhas and W. Pratt, "Digital image restoration under a regression model", *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 252-266, 1975. <https://doi.org/10.1109/TCS.1975.1084026>. 256
- [18] R. Mammone and G. Eichmann, "Superresolving image restoration using linear programming", *Applied optics*, vol. 21, no. 3, pp. 496-501, 1982. <https://doi.org/10.1364/AO.21.000496>. 256
- [19] M. Bazaraa, J. Jarvis, and H. Hanif, *Linear Programming and Network Flows*. Wiley-Interscience, 2004. 256
- [20] S. Mehrotra, "On the implementation of a primal-dual interior point method", *SIAM Journal on optimization*, vol. 2, no. 4, pp. 575-601, 1992. <https://doi.org/10.1287/ijoc.1.2.70>. 256, 258
- [21] R. Kress, *Linear Integral Equations*. Applied Mathematical Sciences 82, Springer-Verlag, 3 ed., 2014. 257
- [22] Vicmat.com, "La conjetura de nicomaco", 2017. 258
- [23] Tucarro.com, 2018. <https://tucarro.com/>. 259
- [24] NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration and K. Noll (STScI), *NGC 6050*. <https://cdn.spacetelescope.org/archives/images/thumb700x/heic0810ap.jpg>. 263
- [25] R. Hanisch, R. White, and R. Gilliland, "Deconvolution of hubbles space telescope images and spectra", in *Deconvolution of images and spectra*, pp. 310-360, Academic Press, 2nd ed., 1996. 264
- [26] D. Biggs and M. Andrews, "Acceleration of iterative image restoration algorithms", *Applied optics*, vol. 36, no. 8, pp. 1766-1775, 1997. <https://doi.org/10.1364/ao.36.001766>. 264
- [27] P. Hansen, J. Nagy, and D. O'leary, *Society for Industrial and Applied Mathematics*. 2006. 264
- [28] D. Krishnan, "<https://dilipkay.wordpress.com/blind-deconvolution/>", 2011. 264
- [29] C. Hansen, J. Nagy, and D. O'Leary, "<http://www.imm.dtu.dk/~pcha/HNO/>", 2011. 264
- [30] U. d. G. Computer Vision Group, "Test images", 2014. <http://decsai.ugr.es/cvg/index2.php>. 264
- [31] Q. Huangfu and J. Hall, "Novel update techniques for the revised simplex method", *Computational Optimization and Applications*, vol. 60, no. 3, pp. 587-608, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10589-014-9689-1>. 269



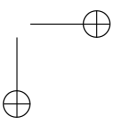
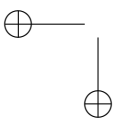
- [32] F. Vitor and T. Easton, "A two dimensional search primal affine scaling interior point algorithm for linear programs", *Proceedings of the 2018 IISE Annual Conference*, pp. 1961-1966, 2018. [269](#)
- [33] Y. Peng, Z. Hao, and X. Yun, "Lock-free parallelization for variance-reduced stochastic gradient descent on streaming data", *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 31, no. 19, pp. 2220-2231, 2020. <https://doi.org/10.1109/tpds.2020.2987867>. [269](#)
- [34] Z. Wang, A. Bovik, H. Sheikh, and E. Simoncelli, "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity", *IEEE transactions on image processing*, vol. 13, no. 4, pp. 600-612, 2004. <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>. [270](#)

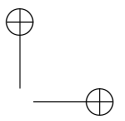
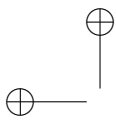
José E. Fuentes

Matemático de la Universidad Nacional de Colombia; Magíster en Matemática Aplicada, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá; Correo electrónico: jefuentesg@unal.edu.co

Jorge Mauricio Ruiz V

Doctor en Matemáticas de la Universidad Nacional de Colombia. Profesor del departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá; Correo electrónico: jmruizv@unal.edu.co





Case-study

Effect of Soiling on the Performance of Photovoltaic Modules in Bogotá

Efecto de la suciedad en el desempeño de módulos fotovoltaicos en Bogotá

Fabián León-Vargas* ¹, **Maira García-Jaramillo** ², **Gelver Magín Yara** ¹, **Alejandro Parra** ³

¹Universidad Antonio Nariño (Bogotá, Colombia), ²Universidad EAN (Bogotá, Colombia), ³Universidad de la Salle (Bogotá, Colombia).

correspondence email: fabianleon@uan.edu.co

Recibido: 01/07/2020. Modificado: 25/01/2021. Aceptado: 03/02/2021.

Abstract

Context: This study analyzes the soiling effect on the energy efficiency of two photovoltaic generation system configurations: one fixed and one mobile (with solar tracking).

Method: A support system and output power measurement adapted for each configuration was implemented. Data was collected during two months in Bogotá. This analysis considered the average power obtained in two 50 W polycrystalline photovoltaic modules integrating each configuration. A test module was assigned for applying a cleaning protocol in each configuration, and the remaining module was assigned as a control module. This result was used in a pre-feasibility analysis for energy self-sufficiency of an average, middle-income household.

Results: A regular cleaning protocol increases the energy productivity of each analyzed photovoltaic system in 3,87 % and 7,23 %, according to its configuration. Additionally, at the economic level, this increase in productivity represents the year-prior amortization of a photovoltaic system for energy self-sufficiency, regardless of the type of configuration used.

Conclusions: A positive impact on the energy efficiency of the two photovoltaic configurations analyzed was found under a regular cleaning protocol in Bogotá. This benefit increases the profitability that could be obtained from investing a system for the energy self-sufficiency of an average family.

Keywords: energy efficiency, photovoltaic system, solar tracker, cleaning protocol, soiling, pre-feasibility.

Acknowledgements: This work has been funded by Universidad Antonio Nariño through project No. 2018230. The authors would like to thank Universidad EAN for supporting this study.

Language: Spanish

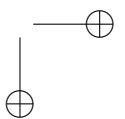
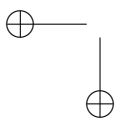
Open access



Cite this paper as: León, F., García, M., Magín, G., Parra, A.: Efecto de la suciedad en el desempeño de módulos fotovoltaicos en Bogotá. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 2, pp. 273-283 (2021).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

<https://doi.org/10.14483/23448393.16601>



Resumen

Contexto: Este estudio analiza el efecto de la suciedad en la eficiencia energética de dos configuraciones de sistemas de generación fotovoltaica: una fija y una móvil (con seguimiento solar).

Método: Se implementó un sistema especial de soporte y medición de la potencia de salida adaptado para cada configuración. Se recopilaron datos durante dos meses en Bogotá. El análisis utiliza la potencia promedio de dos módulos fotovoltaicos policristalinos de 50 W que forman parte de cada configuración. Se asignó un módulo de prueba para la aplicación de un protocolo de limpieza, y el otro fue asignado como módulo control. A partir de este resultado se analizó la prefactibilidad para la autosuficiencia energética de un hogar promedio de ingreso medio.

Resultados: La aplicación de un protocolo de limpieza regular aumenta la productividad energética de cada sistema fotovoltaico entre un 3,87 % y un 7,23 %, de acuerdo con su configuración. A nivel económico, este incremento representa la amortización del sistema fotovoltaico para autosuficiencia energética un año antes, sin importar la configuración empleada.

Conclusiones: Se encontró un impacto positivo en la eficiencia energética bajo un protocolo de limpieza regular en Bogotá. Este beneficio permite aumentar la rentabilidad obtenida de la inversión en un sistema para autoabastecimiento energético de una familia promedio.

Palabras clave: eficiencia energética, sistema fotovoltaico, seguidor solar, protocolo de limpieza, suciedad, prefactibilidad.

Agradecimientos: Este trabajo fue financiado por la Universidad Antonio Nariño a través del proyecto No. 2018230. Los autores agradecen el soporte dado por la Universidad EAN en este trabajo.

Idioma: Español

1. Introducción

La generación de energía eléctrica convencional en Colombia se basa principalmente en hidroeléctricas y sistemas térmicos a base de gas y carbón [1], es decir, recursos no renovables que, además de su deterioro, desencadenan problemas ambientales. Esta situación plantea la necesidad de hacer uso de fuentes de generación de energía eléctrica con un menor impacto ambiental.

En Colombia los recursos energéticos renovables, como el viento y la radiación solar, tienen una mínima participación en la generación de energía eléctrica a nivel nacional (0,2 %) [2], lo que evidencia un gran potencial de crecimiento en el sector, además del beneficio ambiental que representa.

De acuerdo con la subdirección de energía eléctrica, oficina adscrita a la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética) de Colombia, en su informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano del mes de agosto de 2018, la capacidad total instalada de generación del país es de 17.720 MW [3]. Esta misma fuente establece que la generación de energía eléctrica de proyectos de tipo solar fotovoltaico (FV) es de 9,8 MW, es decir el 0,06 % de la capacidad total de generación del país, una cifra significativamente baja si se compara con otros escenarios mundiales.

El mercado solar fotovoltaico aumentó 12 % en 2019 a un récord de 115 GW (corriente continua), para un total de 627 GW [4]. A finales de ese mismo año, había suficiente capacidad en todo el mundo para producir un estimado de 2,8 % de la generación mundial de electricidad a partir de energía solar FV. En Europa la implementación de grandes proyectos de generación solar FV se

ha dado principalmente en países como Italia (8,6 %), Grecia (8,3 %) y Alemania (8,2 %) [4]. En Latinoamérica, Chile es pionero en este tipo de energía (8,1 %); sin embargo, otros países han iniciado una rápida expansión en la generación de energía solar FV. Los principales instaladores de la región fueron Brasil (agregando 2 GW), México (casi 2 GW) y Argentina (0,5 GW). Otros países pusieron en línea una capacidad significativa, incluyendo a Colombia, que encargó una planta de 86 MW, y Jamaica, que completó la instalación de energía solar fotovoltaica más grande del Caribe (51 MW), se espera que la planta proporcione la electricidad de menor costo de la isla [4].

A pesar de las ventajas ambientales atribuibles a los sistemas de generación FV, existen preocupaciones relacionadas con su desempeño real [5]. Si bien la eficiencia energética de estos sistemas suele ser del 15 % al 20 %, esta puede verse afectada considerablemente por condiciones ambientales ajenas a su funcionamiento [5]. En particular, el polvo puede reducir la eficiencia de los módulos FV [6], tal como lo demuestran algunos estudios que reflejan una reducción del 7 % en su eficiencia [7]. Sin embargo, dichas afectaciones pueden ser atenuadas gracias a protocolos de mantenimiento regular basados en índices de criticidad establecidos para ello [8]. Mani *et al.* en 2010 revisaron ciclos de limpieza para mitigar el impacto de la suciedad, recomendando la limpieza semanal durante las estaciones secas y el lavado diario para la acumulación intensiva de polvo [9].

Con el fin de proporcionar información relacionada con el desempeño ante la suciedad que presentan los sistemas de generación FV bajo condiciones ambientales propias de la ciudad de Bogotá, y considerando la falta de estudios similares a la fecha, en este trabajo se evalúa la eficiencia energética de dos configuraciones de generación FV: una fija y una móvil. A partir de este resultado, se plantea un análisis de prefactibilidad de la inversión de un sistema de generación FV a pequeña escala, diseñado para la autosuficiencia energética de un hogar promedio de Bogotá [10]. En este análisis se tiene en cuenta el costo de generación de energía y el tiempo de amortización correspondiente de la inversión.

2. Materiales y métodos

La determinación del efecto de la suciedad en el desempeño de paneles FV se basa en la comparación directa de la eficiencia eléctrica encontrada en sistemas con mantenimiento versus sistemas sin mantenimiento, operando de forma simultánea, y bajo las mismas condiciones de exposición ambiental en la ciudad de Bogotá.

Los sistemas FV analizados en este estudio corresponden a dos configuraciones específicas: una fija y una móvil, es decir, sin seguimiento solar y con seguimiento solar. Para ello se diseñó e implementó una estructura de soporte principal que integra ambas configuraciones, en la que se acondicionó un sistema de medición de potencia que recolectó información durante dos meses de funcionamiento.

En la configuración móvil, el movimiento es controlado por un sistema de seguimiento solar automático, mientras que en la configuración fija se establece una inclinación estática de 10° orientada hacia el ecuador terrestre.

A continuación se presentan aspectos de diseño de la estructura soporte de ambas configuraciones, las consideraciones del protocolo de mantenimiento y el planteamiento económico usado en este estudio.

2.1. Estructura soporte

La estructura de medición está basada en el diseño conceptual de la Figura 1. Cada configuración incluye dos módulos FV policristalinos de 50 W independientes, entre los cuales, solo uno de ellos recibe un protocolo de limpieza regular.

En la configuración móvil, Figura 1 (izq.), se implementa un sistema de actuación de doble eje conformado por actuadores lineales de 16" de desplazamiento y capacidad de carga de 1.500 N, el cual fue programado con un intervalo de tiempo de movimiento de dos minutos.

2.2. Protocolo de limpieza

La periodicidad de la limpieza de los módulos, es decir, el protocolo utilizado en este estudio, se basa en un índice de criticidad que forma parte del estándar AS/NZ 4509-2:2010 de Nueva Zelanda [7]. Dicho índice establece que, para sistemas no conectados a la red eléctrica convencional, se debe realizar una limpieza de módulos FV cada vez que se detecta una pérdida del 2 % de su potencia nominal.

Teniendo en cuenta que los módulos usados en este estudio son de 50 W, dicha pérdida corresponde a 1 W. En una prueba preliminar se determinó que, para la ubicación geográfica de prueba, dicha condición de criticidad se cumplía aproximadamente cada cinco días.

El proceso de limpieza consistió en la aplicación de agua y secado con paños suaves sobre la superficie de los paneles FV. Este proceso se aplicó en horas de baja irradiancia para evitar cambios bruscos de temperatura en el panel [11].

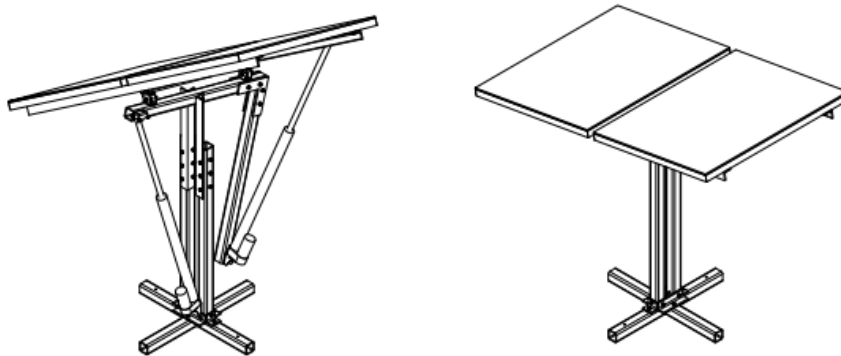


Figura 1. Modelo conceptual de la estructura soporte utilizada en la configuración móvil (izquierda) y fija (derecha).

2.3. Análisis económico

El análisis económico realizado se centra en la rentabilidad obtenida con cada configuración a través del indicador tiempo de amortización (TA) para sistemas de generación FV, ver Ecuación (1).

$$TA = \frac{CE + CI}{12 \cdot E_R \cdot C_{ref} - ARC} \quad (1)$$

donde CE es el costo total de los equipos, CI es el costo de instalación, C_{ref} es el costo de referencia por kWh, ARC es el costo anual recurrente, y E_R es la energía mensual generada. Una descripción detallada del uso de este indicador para sistemas FV, y otros indicadores relevantes como el LCOE, se pueden hallar en [10]. Para este estudio, se consideran las diferencias estimadas en la energía generada E_R en función de la eficiencia energética obtenida con cada una de las configuraciones analizadas. De igual forma, en los cálculos realizados, se tiene en cuenta la aplicación de incentivos económicos establecidos por la ley 1715 de 2014.

3. Resultados

3.1. Sistema de medición

El sistema de medición fue ubicado en la zona sur de la ciudad de Bogotá (4° 35' 56" Latitud Norte), en un área que incluye vías de transporte público y una estación meteorológica distrital, ver Figura 2.



Figura 2. Ubicación del sistema de medición.

En la Figura 3 se observa el resultado de la construcción de la estructura soporte que implementa ambas configuraciones de medición. Esta estructura fue hecha en aluminio de aleación 6061-T6, en tubo cuadrado de 1½” (38,1 mm) y espesor 1/16” (1,5mm).



Figura 3. Sistema de medición montado sobre una estructura soporte de aluminio.

La potencia de salida de cada configuración fue medida con un sistema de adquisición de datos basado en la plataforma Arduino, utilizando cuatro sensores de corriente DS3231 y cuatro sensores de voltaje FZ0430, ver Figura 4. Los datos de voltaje y corriente obtenidos en cada módulo FV fueron medidos cada dos minutos sobre una carga resistiva de 50 W.

3.2. Eficiencia energética

La Figura 5 presenta los resultados de la potencia promedio diaria obtenida de la información recopilada durante dos meses de medición continua.

En la Tabla I se muestra el valor de potencia promedio global obtenida de acuerdo con el tipo de configuración (móvil o fija), y aplicación del protocolo de limpieza.

Tabla I. Potencia promedio obtenida con cada configuración

Configuración	Conlimpieza	Sin limpieza
	(W)	(W)
Móvil	23,68	22,08
Fija	18,20	17,52

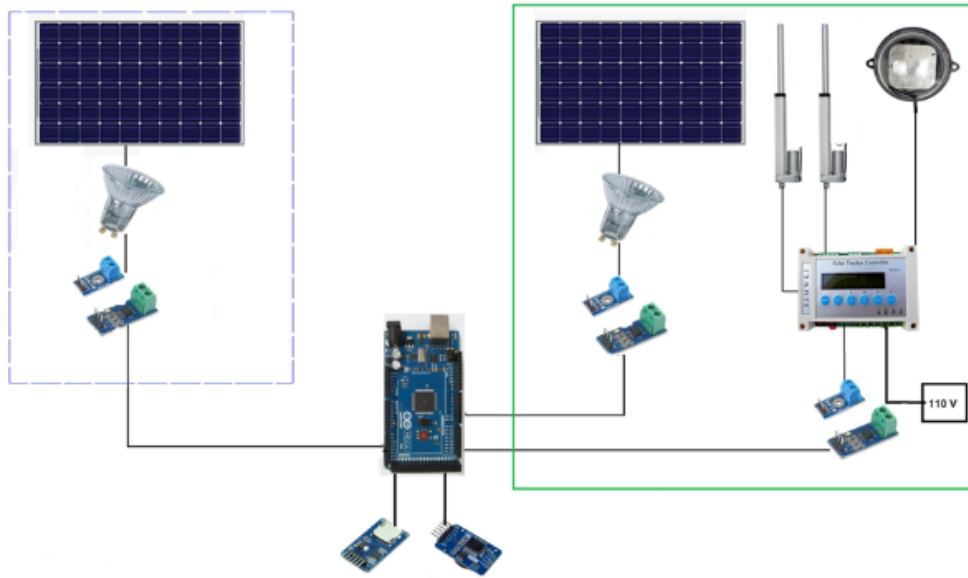


Figura 4. Esquemático del sistema de medición de potencia de bajo costo basado en la plataforma Arduino.

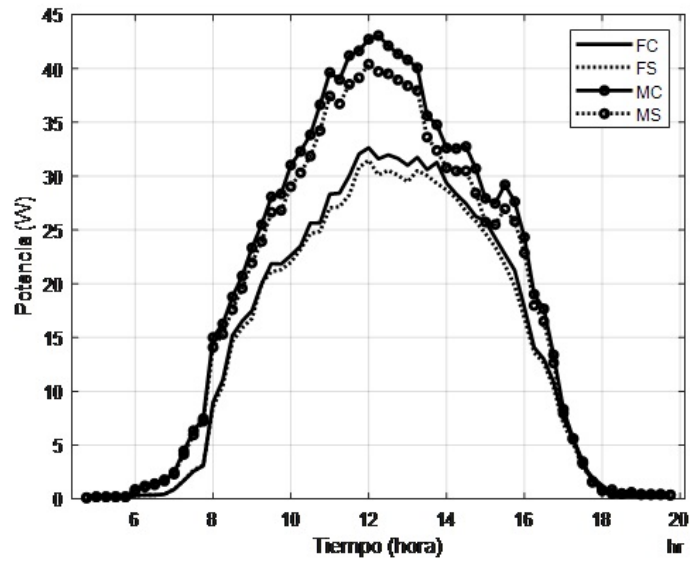


Figura 5. Potencia diaria promedio obtenida con cada configuración. Línea punteada: config. fija sin limpieza (FS). Línea sólida: config. fija con limpieza (FC). Línea punteada con o: config. móvil sin limpieza (MS). Línea sólida con o: config. móvil con limpieza (MC).

A partir de estos resultados, se obtiene la productividad relativa al uso del protocolo de limpieza de acuerdo con la Ecuación (2).

$$\delta = \frac{P_C - P_S}{P_S} \cdot 100 \quad (2)$$

donde P_S corresponde a la potencia del módulo sin limpieza, y P_C a la potencia del módulo con limpieza.

A partir de la Ecuación (2) se observa un incremento de 7,23 % y 3,87 % en la productividad energética de la configuración móvil y fija, respectivamente, al aplicar el protocolo de limpieza respecto a no hacerlo.

Por su parte, al comparar la eficiencia relativa entre las configuraciones móvil y fija, se encontró un incremento de 30,09 % en la potencia de la configuración móvil respecto de la fija, aplicando limpieza en ambos casos. Sin limpieza, se encontró un incremento de 26,02 % en la potencia de la configuración móvil respecto de la fija. Esta diferencia en la eficiencia relativa entre ambas configuraciones es consistente con estudios similares [12].

3.3. Prefactibilidad

Para el cálculo del indicador de tiempo de amortización de la Ecuación (1), se estimó la energía real generada de cada configuración, teniendo en cuenta las diferencias de potencia promedio encontradas en los distintos casos abordados en este estudio.

La energía generada mensualmente ER en cada caso se estima con base en la energía utilizada en los cálculos económicos del estudio [10], es decir, 191,82 kWh, asociada con la configuración fija sin protocolo de limpieza. Esto implica que en los demás casos la energía generada será superior, teniendo en cuenta el porcentaje relativo incremental de las potencias presentadas en la Tabla I.

El valor de CI y ARC corresponde al 10 % y 1 % del valor de CE , respectivamente. El valor de C_{ref} y CE usado está basado en el cálculo de un estudio de prefactibilidad previo [10]; sin embargo, para la configuración móvil, se incluye además un sistema de seguimiento solar automático, con un precio de mercado estimado de €660 (sin IVA) [13], que cumple con las características de carga requeridas.

En la Tabla II se presenta la estimación de la energía total generada mensualmente en cada caso; sin embargo, para la configuración móvil se consideró un descuento del 3,5 %, debido al consumo energético requerido por el sistema de seguimiento [14]. De igual forma, en la Tabla II se presentan los valores del indicador tiempo de amortización de la inversión para cada caso, asumiendo la aplicación de los incentivos de la Ley 1715 de 2014.

Tabla II. Estimación de la energía real generada y tiempo de amortización en cada caso

Configuración	ER (kWh)	TA (años)
Fija sin limpieza	191,82*	15,2
Fija con limpieza	199,24	14,5
Móvil sin limpieza	235,03	12,1
Móvil con limpieza	252,55	11,1

*Tomado de [10]

4. Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio permiten demostrar la importancia atribuible a un buen protocolo de mantenimiento/limpieza sobre los sistemas de generación FV. Sin embargo, es preciso considerar algunas limitaciones presentes en su desarrollo.

La duración del estudio, si bien es corta para un análisis definitivo, proporciona una aproximación del desempeño esperado, el cual es consistente con resultados de estudios similares que analizan la productividad energética de estos sistemas en un año de funcionamiento bajo condiciones de suciedad en los módulos FV [15].

La diferencia encontrada en los porcentajes de eficiencia energética obtenida al aplicar el protocolo de limpieza en cada configuración fue distinta, siendo de aproximadamente la mitad para el caso fijo respecto al móvil (3,87 % vs 7,23 %). Esto quiere decir que la configuración fija sufrió en menor medida el efecto de la suciedad ambiental en su productividad energética. Una razón que podría explicar este fenómeno es el efecto de limpieza que tienen las lluvias. Durante los dos meses de recolección de datos se presentaron lluvias frecuentes en la zona, y debido a la inclinación invariable de 10° de la configuración fija, el flujo del líquido pudo desplazar con mayor eficiencia la suciedad superficial de los módulos respecto a la configuración móvil.

La ubicación del estudio se limitó a la ciudad de Bogotá, dado que se trata de la principal urbe del país, lo que proporciona la facilidad de acceso que se encontró para el registro de la información. Además, en la elección de la ubicación utilizada al interior de la ciudad se tuvo en cuenta una zona de alta exposición a contaminación ambiental por polución, debido a su cercanía con una vía altamente transitada por vehículos de transporte público y, que a su vez, está expuesta al polvo de vías sin asfalto apropiado localizadas a su alrededor.

Si bien la configuración móvil, en general, demuestra prestaciones de eficiencia superiores a su contraparte fija, es importante considerar el espacio de instalación requerido por el sistema de seguimiento solar; el cual ocuparía condiciones de instalación adicionales que limitan aún más el alcance de viviendas apropiadas para una aplicación urbana de este sistema.

El objetivo de incorporar un análisis básico de prefactibilidad en este estudio fue mostrar el impacto económico estimado que trae consigo la incorporación de un protocolo de mantenimiento para las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá. El indicador tiempo de amortización, utilizado en este estudio, podría ser complementado con otros indicadores económicos, como *Levelized Cost of Energy* (LCOE), para establecer con mayor veracidad el impacto de estos protocolos en configuraciones fijas o móviles de sistemas PV.

En este estudio no se consideró el impacto económico asociado con la aplicación de los incentivos propios de la ley 1715 en sistemas renovables. Sin embargo, se debe tener presente que, de no aplicarse efectivamente dichos incentivos, el tiempo de amortización de la inversión, para las condiciones consideradas en el presente estudio, podría incrementarse en promedio cinco años en cada caso [10].

5. Conclusión

Los sistemas FV analizados presentan un deterioro en la productividad energética debido a la suciedad presente en el ambiente de la ciudad de Bogotá. La eficiencia energética de cada configuración se ve afectada en diferente medida, presentándose una reducción del 3,87 % para el caso fijo, y del 7,23 % para el caso móvil. Este impacto de la suciedad en la productividad energética de los sistemas FV analizados representa un aumento en el tiempo de amortización de la inversión de aproximadamente un año para cada configuración. Estas técnicas de mantenimiento preventivo pueden contrarrestar el efecto de la suciedad a través de protocolos de limpieza que conducirían a un mejor desempeño de los sistemas FV y por ende a un mayor beneficio económico de los mismos.

References

- [1] G. Carvajal-Romo, M. Valderrama-Mendoza, D. Rodríguez-Urrego y L. Rodríguez-Urrego, "Assessment of Solar and Wind Energy Potential in La Guajira, Colombia: Current Status, and Future Prospects", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 36, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100531> ↑274
- [2] XM Compañía de Expertos en Mercados. "Descripción del sistema eléctrico colombiano". <https://www.xm.com.co/Paginas/Mercado-de-energia/descripcion-del-sistema-electrico-colombiano.aspx> ↑274
- [3] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), "Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano", agosto, 2018. http://www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2018/Informe_de_variables_Ago_2018.pdf ↑274
- [4] REN21, "Renewables 2020 Global Status Report", 2019. <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/> ↑274, 275
- [5] M. R. Maghami, H. Hizam, C. Gomes, M. A. Radzi, M. I. Rezadad y S. Hajighorbani, "Power Loss Due to Soiling on Solar Panel: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 1307-1316, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.044> ↑275
- [6] M. M. Fraga, B. L. de Oliveira Campos, T. B. de Almeida, J. M. Fraga da Fonseca y V. de Freitas Cunha Lins, "Analysis of the Soiling Effect on the Performance of Photovoltaic Modules on a Soccer Stadium in Minas Gerais, Brazil", *Solar Energy*, vol. 163, pp. 387-397, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.025> ↑275
- [7] S. A. M. Said, "Effects of Dust Accumulation on Performances of Thermal and Photovoltaic Flat-Plate Collectors", *Applied Energy*, vol. 37(1), pp. 73-84, 1990. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(90\)90019-A](https://doi.org/10.1016/0306-2619(90)90019-A) ↑275, 276

- [8] Australian/New Zealand Standard AS/NZS 4509.2:2010. <https://www.standards.govt.nz/shop/asnzs-4509-22010/> ↑275
- [9] M. Mani y R. Pillai, "Impact of Dust on Solar Photovoltaic (PV) Performance: Research Status, Challenges and Recommendations", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14 (9), pp. 3124-3131, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065> ↑275
- [10] F. León-Vargas, M. García-Jaramillo y E. Krejci, "Pre-Feasibility of Wind and Solar Systems for Residential Self-Sufficiency in Four Urban Locations of Colombia: Implication of New Incentives Included in Law 1715", *Renewable Energy*, vol. 130, pp. 1082-1091, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.087> ↑275, 277, 280, 281, 282
- [11] M. Campos. *Planta solar fotovoltaica de 500kw sobre la cubierta de una nave industrial en la ciudad de Sevilla*. Manual de mantenimiento. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2012. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5074/fichero/Volumen+5%252F9.+Manual+de+Manteminiento.pdf> ↑276
- [12] J. A. Pelayo, A. Soto, F. Ramos, y B. Guzmán, "Comparativa de la eficiencia entre un sistema fotovoltaico con seguimiento solar y un sistema fotovoltaico fijo", *CIBA: Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, vol. 7(13), pp. 105- 129, 2018. <https://doi.org/10.23913/ciba.v7i13.76> ↑280
- [13] SAT CONTROL, Solar Tracking Systems: Dual Axis Solar Trackers, s.f. <http://www.solar-motors.com/gb/solar-trackers/dual-axis-sun-trackers-g78.shtml> ↑280
- [14] G. J. Prinsloo y R. T. Dobson. *Solar Tracking*. Stellenbosch, Sudáfrica: SolarBooks, 2015. ↑280
- [15] R. R. Cordero, A. Damiani, D. Laroze *et al.*, "Effects of Soiling on Photovoltaic (PV) Modules in the Atacama Desert", *Scientific Reports*, vol. 8, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32291-8> ↑281

Fabián León-Vargas

Doctor en Tecnología de la Universidad de Girona (España); Magíster en Informática Industrial y Automática de la Universidad de Girona (España); Ingeniero Electrónico de la Universidad Industrial de Santander; Docente de la Universidad Antonio Nariño; Líder del grupo de investigación REM de la Universidad Antonio Nariño.
Correo electrónico: fabianleon@uan.edu.co

Maira García-Jaramillo

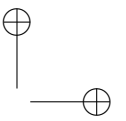
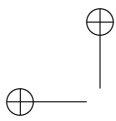
Doctora en Tecnología de la Universidad de Girona (España); Magíster en Tecnología de la Información de la Universidad de Girona (España); Ingeniera de Sistemas de la Universidad Francisco de Paula Santander; Docente de la Universidad EAN; Líder del Grupo de Investigación y Desarrollo Tecnológico ONTARE.
Correo electrónico: magarcia@universidadean.edu.co

Gelver Magín Yara

Ingeniero Electromecánico de la Universidad Antonio Nariño.
Correo electrónico: gmagin798@uan.edu.co

Alejandro Parra

Doctor en Economía Internacional y Desarrollo de la Universidad Complutense de Madrid (España); Magíster en Economía Internacional y Desarrollo de la Universidad Complutense de Madrid (España); Economista de la Universidad de la Salle; Docente de la Universidad de la Salle; pertenece al grupo de investigación Centro Lasallista de Investigación y Modelación Ambiental CLIMA.
Correo electrónico: alparra@unisalle.edu.co



Research

Vision-based Software Tool System for Position Estimation Using a Smartphone

Sistema de herramientas software basado en visión para la estimación de posición usando un teléfono inteligente

Urbano Julio*¹, Bacca-Cortes Bladimir¹, Buitrago-Molina José¹

¹Universidad del Valle (Cali-Colombia).

correspondence email: bladimir.bacca@correounivalle.edu.co

Recibido: 24/06/2020. Modificado: 07/05/2021. Aceptado: 11/05/2021.

Abstract

Context: Current smartphone models have a very interesting set of sensors such as cameras, IMUs, GPS, and environmental variables. This combination of sensors motivates the use of smartphones in scientific and service applications. One of these applications is precision agriculture, specifically drone position estimation using computer vision in GPS-denied environments for remote crop measurements.

Method: This work presents the development of EVP, a vision-based position estimation system using a modern smartphone and computer vision methods. EVP consists of two software applications: an Android app (mobile station) running on a smartphone capable of controlling the drone's flight, acquiring images, and transmitting them through a wireless network; and another application (base station) running on a Linux-based computer capable of receiving the images, processing them and running the position estimation algorithms using the acquired images. In this work, the mobile station is placed in a quadcopter. Using EVP, users can configure the mobile and base station software, execute the vision-based position estimation method, observe position graph results on the base station, and store sensor data in a database.

Results: EVP was tested in three field tests: an indoor environment, an open field flight, and a field test over the Engineering Department's square at Universidad del Valle. The root mean square errors obtained in XY were 0,166 m, 2,8 m, and 1,4 m, respectively, and they were compared against the GPS-RTK measurements.

Conclusions: As a result, a vision-based position estimation system called EVP was developed and tested in realworld experiments. This system can be used in GPS-denied environments to perform tasks such as 3D mapping, pick-up and delivery of goods, object tracking, among others.

Keywords: Smartphone, position estimation, computer vision.

Acknowledgements: This work was partially funded by the research project "Autonomous Aerial System to Map the Nitrogen Contents in Crops using Micro-Spectral Sensors", contract CI2961 of Universidad del Valle.

Language: Spanish

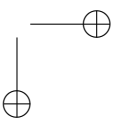
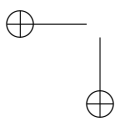
Open access



Cite this paper as: J. Urbano, B. Baca-Cortes, and J. Buitrago-Molina. Vision-based Software Tool System for Position Estimation Using a Smartphone. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 2, pp. 284-305 (2021).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

<https://doi.org/10.14483/23448393.16562>



Resumen

Contexto: Los actuales modelos de teléfonos inteligentes tienen un conjunto muy interesante de sensores como cámaras, IMUs, GPS y variables ambientales. Esta combinación de sensores motiva el uso de los teléfonos inteligentes en aplicaciones científicas y de servicio. Una de estas aplicaciones es la agricultura de precisión, específicamente la estimación de posición de un dron usando visión por computador para realizar mediciones remotas en cultivos.

Método: Este trabajo presenta el desarrollo de EVP, un sistema de estimación de posición basado en visión usando un teléfono inteligente moderno y métodos de visión por computador. EVP consiste en dos aplicaciones software, una app de Android (estación móvil) ejecutándose en un teléfono inteligente capaz de controlar el vuelo de un dron, capturar imágenes, y transmitir las a través de una red inalámbrica; y otra aplicación (estación base) ejecutándose en un PC Linux capaz de recibir imágenes, procesarlas y ejecutar los algoritmos de estimación de posición usando las imágenes adquiridas. En este trabajo, la estación móvil está ubicada en un cuadricóptero. Usando EVP, los usuarios pueden configurar el software de la estación móvil y base, ejecutar el método de estimación de posición basado en visión, observar resultados gráficos de la posición en la estación base y almacenar los datos adquiridos en una base de datos.

Resultados: EVP fue probada en tres pruebas de campo: en ambientes de interiores, un vuelo en campo abierto, y sobre la plazoleta de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle. Los errores cuadráticos medios en XY fueron 0,166 m, 2,8 m y 1,4 m respectivamente y comparados con las medidas de GPS-RTK.

Conclusiones: Como resultado, un sistema de estimación de posición basado en visión llamado EVP fue desarrollado y probado en experimentos reales. Este sistema puede ser usado en ambientes sin señal de GPS para realizar tareas como mapeo 3D, recogida y entrega de materiales, seguimiento de objetivos, entre otros.

Palabras clave: Teléfono inteligente, estimación de posición, visión por computador.

Agradecimientos: Este trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto de investigación “Sistema Aéreo Autónomo para Mapear el Contenido de Nitrógeno en Cultivos usando Sensores Micro-espectrales”, contrato CI2961 de la Universidad del Valle.

Idioma: Español

1. Introduction

Nowadays, smartphones have a high CPU performance, many communication protocols (Wi-Fi, Bluetooth, NFC, etc.), and a set of specialized sensors (GPS, inertial measurement units, cameras, pressure, light, etc.). Using these sensors individually or together generates novel development and research options for applications involving position estimation, where GPS-based methods are most popular. However, update rate, precision, and signal availability are serious concerns regarding this method. On the other hand, fine camera motions can be tracked using popular computer vision techniques such as structure-from-motion [1], visual odometry [2], bundle-adjustment [1], and simultaneous localization and mapping [3]. Nevertheless, all these methods are computationally expensive, and their implementation into a mobile phone is not straight-forward, which is why this work describes the development of EVP, a visual-based software system to estimate the position of a smartphone without relying on any external infrastructure or prior knowledge of the environment.

Using handheld devices for position estimation opens several research and application horizons. For instance, this work was developed as a part of a research project in the context of precision agriculture, where UAV (quadcopters) platforms are used to sense nitrogen signatures in crops using micro-spectral devices. To do so, UAVs must follow a pre-computed path to perform the corresponding measurements. This is the global task in the *Autonomous Aerial System to Map the Nitrogen Contents in Crops using Micro-Spectral Sensors* research project of Universidad del Valle, where this work will play the role of following the crop tracks. Additionally, other applications are building collaborative mosaics using several drones of wide farmlands or carrying out inspection tasks on civil structures using low-cost drones. Therefore, the visual-based software system for position estimation described in this work (Fig. 1) was developed in two parts: first, the base station, which allows users to configure the motion estimation algorithms, acquiring remote images from a drone, estimating the smartphone position, and visualizing the camera trajectory in a user-friendly GUI; and second, the mobile application, which transmits telemetry and image data to the base station. It is worth noting that the quadcopter flight controller in this work is implemented into the smartphone [4] using its built-in inertial sensors and its computational and communication capabilities.

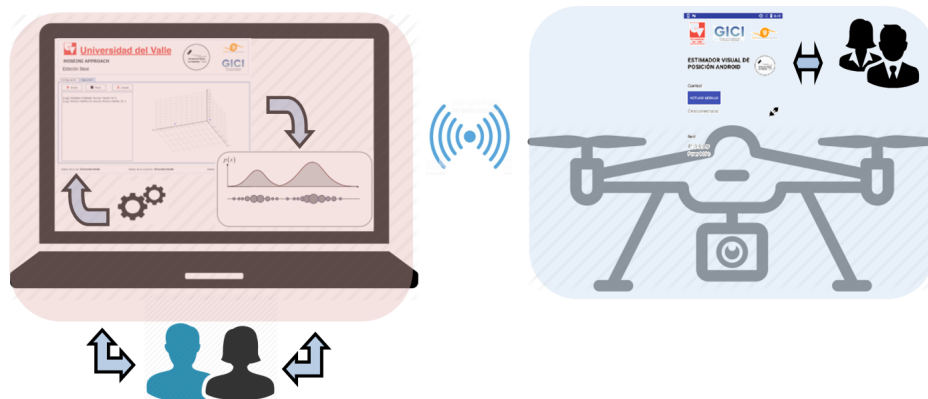


Figure 1. EVP system overview

This work is structured as follows: section 2 describes the related works; section 3 contains the background concepts of monocular position estimation; section 4 shows the design and implementation of EVP; section 5 presents the tests performed and their results; and section 6 is dedicated to our conclusions.

2. Related works

Table I summarizes the most relevant works related to this paper, which emphasize on position estimation using mobile devices and computer vision methods. These works were compared considering properties such as the computational platform used, the position computation method, the type of tests performed, camera resolution and orientation, the DOF computed by the algorithm, the speed of processing in FPS, and whether the algorithm runs on-line or off-line.

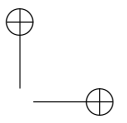
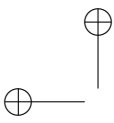
In Table I, the related works can be divided by the position estimation method, used in four categories as follows: SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) based solutions, visual odometry methods, structure from motion approaches, and custom methods. SLAM-based solutions work using images with reduced resolution, due the computational cost of the SLAM pipeline. For instance, the best results reported correspond to [5], where a position error of up to 2,21 m in a field of 600 m² was achieved. In this case, a PTAM (Parallel Tracking Mapping) method was used to estimate the 6DOF of the smartphone. In [6], the authors propose position estimation methods based on monocular and EKF SLAM, respectively. However, as shown in Table I, the processing speeds achieved were not high enough to be used in dynamic environments.

To estimate the position of a mobile vehicle in space while reducing the computational cost, other methods lighter than SLAM-based approaches could be explored. That is the case of the works in Table I that use visual odometry. In [7], the authors propose a position estimation system based on visual odometry methods using a Huawei smartphone, which is used for augmented reality applications. In [8], a visual odometry system is proposed for applications involving assisted navigation for blind people, where a graph model of the environment is computed. Some visual odometry methods implemented in the works shown in Table I perform well, considering some constraints such as putting artificial landmarks in the environment [9], [10], or working along short distances [11]. In [9], [11], and [10], these constraints had to be kept in mind, given that loop closure computations were not considered. However, in [12], the authors are continuously building a semi-dense map and matching the current image with it to estimate the smartphone's position in real time. This position estimation method is used for indoor augmented reality applications.

Another option for position estimation of a mobile device with constrained computation resources is to divide the estimation process in two parts: one part corresponds to heavy calculations, and another one to mobile data acquisition. This strategy is observed in various works in Table I, especially those corresponding to structure from motion and custom methods. Structure from motion-based methods involve heavy computation procedures, but they yield very precise results. For this reason, in [13] and [14], two main steps are considered: first, a mapping stage where a previous map is computed; and second, a localization stage where the mobile device (a smartphone

Table I. Related works

Ref.	Platform	Method	Tests	Resol.	Cam. Head.	DOF	FPS	Run
[5]	iPhone 3G	PTAM	Real	240x320	Vertical	6	30	Online
[6]	Samsung S2 - PC	Mon. SLAM	Real	640x480	Horizontal	6	1	Online
[7]	Huawei	Vis. Odom.	Real	1334x750	Horizontal	4	-	Online
[9]	Samsung S4	Vis. Odom.	Real	320x240	Horizontal	4	15	Online
[8]	iPhone 7	Vis. Odom.	Real	640x480	Horizontal	6	20	Online
[11]	M. device - PC	Vis. Odom.	Simulation	1392x512	Horizontal	4	1	Offline
[10]	iPhone 8	Vis. Odom.	Real	1334x750	Vertical	2	-	Online
[13]	M. device - PC	Bund. Adj.	Real	3024x4032	Vertical	-	-	Offline
[14]	M. device - PC	SFM	Real	-	Horizontal	3	30	Online
[15]	JetsonTX2 - PC	Edge Mat.	Structured	-	Horizontal	3	15	Offline
[16]	M. device	App. Based	Database	2560x1920	Horizontal	1	-	Offline
[17]	iPhone 6S	Homog. Est.	Real	3072x2048	Horizontal	3	-	Online



in [13] and a drone in [14]) remotely receives the position estimation. In both cases, bundle adjustment and structure from motion methods are used to estimate the position of the mobile device using non-linear minimization approaches of the re-projection error in a set of continuous images.

Custom methods to estimate mobile device position in space are also used. In [15], [16], and [17], the authors propose two appearance-based methods to estimate relative position. In [15], the authors use an edge-based matcher in structured environments to compute the relative position of a small drone. In [16], they use a pre-loaded image database, SURF features, and the smartphone's camera data to estimate the user position in 1D indoors environments such as hallways. In these cases, most of the hard work is done remotely, and it assumes that the environment was previously mapped. In [17], an optimal homography computation method is proposed; in this approach, markers are used to validate the planar constraint when computing the homography matrix.

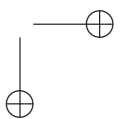
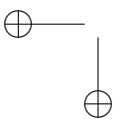
Table I describes important properties when it comes to developing a position estimation system that uses a mobile device. EVP was developed considering the following properties: first, it is divided in two parts, one focused on the position calculation (base station, where CPU-demanding algorithms are executed) and another one in data acquisition (smartphone). Second, although visual odometry methods could be used, SLAM-based methods constitute a more compact solution. For this reason, this study uses the ORB-SLAM approach [18]. Third, to constraint the communication bandwidth and the processing time, the captured images must have a reduced resolution. Fourth, horizontal camera orientation is preferred to increase the time in which image features can be tracked. Finally, online operation is desired.

3. Monocular vision-based position estimation

According to Fig. 1, the position estimation system proposed for this work includes one monocular camera, which is why, in this work, position estimation is done using monocular SLAM, specifically with the ORB-SLAM approach [18]. In this approach, the camera position is defined with respect to a reference coordinate frame W . At each time instant k , the camera position can be defined using the element $T_k \in SE3$, where T_k defines a transformation of coordinates between W and the camera center of projection C . Then, any point in space p with respect to W can be projected into an X image point using Eq. (1):

$$X = K \cdot T_{hk} \cdot P \quad (1)$$

Where K is the intrinsic calibration matrix, T_{hk} is the camera position in homogeneous coordinates, P is the 3D space point in homogenous coordinates, and X is the image point in homogenous coordinates. Then, all interest points automatically detected in ORB-SLAM use Eq. (1) to get their representation in image space. These interest points are binary features called ORB [19]. In comparison with their counterparts, such as SIFT or SURF, ORB image descriptors are faster to detect and match. By using these image descriptors, ORB-SLAM implements a bundle adjustment approach in conjunction with a key frame selection method to estimate the 3D location in space of the ORB features.



While using these 3D features at each bundle of images, three threads are running: tracking, local mapping, and loop closing. The aim of the tracking thread is to estimate the camera position at every frame and decide when a key frame is to be inserted to boost the bundle adjustment algorithm. Then, using the key frames detected so far, local mapping is built using local bundle adjustment; additionally, this algorithm is used to remove low quality features and redundant key frames. In the context of SLAM methods, it is important to solve the loop closure problem. In ORB-SLAM, this is done by means of similarity measurements each time a key frame is detected. If a loop closure is detected, a position graph optimization process is performed. All these tasks are detailed in the following subsections to understand how the position of the drone is estimated in this work.

3.1. Initialization

At the very beginning, image features must be initialized properly, even though the scene may have planar or non-planar structures. First, ORB features are extracted from current frame F_c and reference frame F_r . Then, correspondences are found in frames $x_c \leftrightarrow x_r$. Second, homography and the fundamental matrix are robustly computed using Eq. (2):

$$x_c = H_{cr}x_r \quad ; \quad x_c^T F_{cr} x_r = 0 \quad (2)$$

The homography and fundamental matrix models are scored [18], and only one is selected to estimate the initial relative motion until the second key frame is selected. Along this trajectory, local bundle adjustment is performed to optimize camera position.

3.2. Tracking

The tracking thread in ORB-SLAM uses the ORB descriptors computed from FAST corners in the current image frame F_r [18]. Then, a constant velocity model is implemented to predict the camera position and use it to search map points already stored in other neighboring key frames. This search is performed by projecting a local map of key points into the current frame F_C . The camera position is optimized with all the map points found that satisfy a specific set of conditions. First, the re-projection error of map key points must be minimized using Eqs. (3) and (4):

$$e_i = x_c^i - \pi(T_c, X_k^i) \quad (3)$$

$$C = \sum_i \delta(e_i^T \Omega e_i) \quad (4)$$

Where e_i is the i -th re-projection error of the i -th key point in the local map, x_c^i is the i -th key point in the image, π is the re-projection function, which depends on the current camera position T_c and the 3D world map point X_k^i , C is the function to minimize which depends on the Huber robust cost function δ , and Ω is the uncertainty with respect to the scale. Second, all key points which viewing direction, compared to the map mean viewing direction that are less than $\cos(60^\circ)$ are kept. Also, all key points which are outside the map scale invariance region must be discarded. Once the camera position is tracked, the insertion of key frames depends on conditions such as the number of frames from the last global re-localization, the number of frames from the last key frame

insertion, the minimum number of map points tracked, and the percentage of map points tracked since F_r .

3.3. Local mapping

The local mapping thread tracks the points as described in Section 3.2 and checks if they are observed for at least three key frames [18]. Then, if those points have no previous matches with other map points, they are added to the current local map. This means that these new points are linked with the corresponding key frame in the local graph representation. Afterwards, local bundle adjustment (Eqs. (3) and (4)) is performed using the current frame F_c and all neighbor key frames that are related to F_c through the shared ORB features. This is done to refine the camera positions in the graph map representation. Finally, in this thread, key frame removing is performed if 90% of the ORB features are observed in at least other three key frames.

3.4. Loop closure

In parallel, the loop closing thread uses the current processed key frame F_c and tries to detect loop closure events. To do so, a robust and dynamic bag-of-words approach is performed [18] each time a key frame is added to the graph map. By using this bag of words, all current ORB features belonging to the current key frame are used to find correspondences with other key frames (at least 30 neighbors). A loop closure candidate is accepted if it is possible to track it in at least 3 key frames. Then, using all the key frame candidates F_l and their correspondences with the current frame F_c , a transformation similarity is computed to know the geometric error accumulated in the loop. This relative similarity optimization is described in Eqs. (5) and (6).

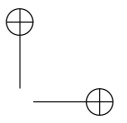
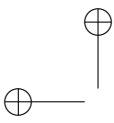
$$\begin{aligned} e_1 &= x_{1,i} - \pi_1(S_{1,2}, X_{2,j}) \\ e_2 &= x_{2,j} - \pi_2(S_{1,2}^{-1}, X_{1,i}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$C = \sum_n \left(\rho_h(e_1^T \Omega_{1,i}^{-1} e_1) + \rho_h(e_2^T \Omega_{2,j}^{-1} e_2) \right) \quad (6)$$

Where e_1 and e_2 define the re-projection errors between key frame 1 and 2; $x_{1,i}$ and $x_{2,j}$ are the corresponding ORB features; π_1 and π_2 are the projection functions at each key frame; $S_{1,2}$ is the relative transformation between key frames 1 and 2; $X_{1,i}$ and $X_{2,j}$ are the corresponding 3D map points; $\Omega_{1,i}^{-1}$ and $\Omega_{2,j}^{-1}$ are the covariances matrices associated to scale at each key frame; and C is the cost function to minimize. Then, the selected loop closure candidate will be the one that better explains the geometric constraints of all key frames and common correspondences with F_c in the loop.

4. Development of EVP

As depicted in Fig. 1, EVP was developed in two main parts, namely the base station and the mobile device. The base station allows users to configure, compute, and monitor the position estimation of a drone. This process is a CPU-demanding task that is performed off-board the drone.



The flight controller of the drone (mobile station) is based on an Android smartphone, which is also in charge of acquiring and transmitting images to the base station. Therefore, two software developments are present in this work, which are described in detail in the following sections, considering the RUP [20] methodology for software engineering. This software development methodology includes various design and test documents, but, to keep this document short, only the functional and non-functional requirements, concept diagram, and class diagrams are described in this work.

4.1. Design of EVP

Considering the analysis of the related works presented in section 2, the functional and non-functional requirements for the EVP software tool in the base station are detailed below:

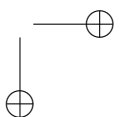
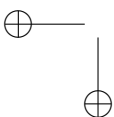
- *Functional requirements:* Users are able to configure the position estimation algorithm using a friendly GUI; they are able to set all the flight mission parameters using a friendly GUI; and they are able to start, stop, and resume a flight mission using the GUI. EVP must allow connecting with the drone, using wireless communication to receive the acquired images; it uses the images to estimate the drone's position in space. Users are able to visualize the estimated position graphically, and EVP must send the estimated position to the drone.
- *Non-functional requirements:* the development environment is based on Java 8, update 121. EVP uses the jmatplot API to show the estimated position, and it uses OpenCV version 3.4. EVP runs on Ubuntu Linux 16.04.5. The IDE used to develop EVP is NetBeans 8.0.2.

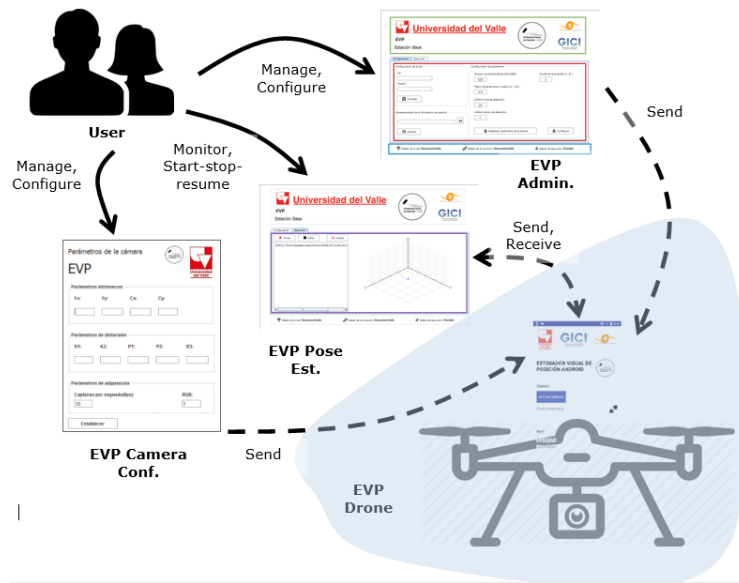
These functional requirements were mapped into the concept diagram shown in Fig. 2a. In this Figure, it can be observed that users in the base station can manage, configure, monitor, and operate the mission using the EVP GUI, which runs on the base station and is also in charge of communicating with the drone to send the configuration parameters and receive the images acquired by the smartphone. These images are used to compute the drone position off-board. Afterwards, this position is used in the base station to plot the graphs and then send them back to the drone.

Considering the functional requirements described above and the conceptual diagram depicted in Fig. 2a, the EVP base station software tool was implemented using the class diagram shown in Fig. 2b. In this diagram, the EVP station base software was divided into three packages: GUI event handlers (blue boxes), data processing (orange boxes), and GUI containers (green boxes). GUI event handlers implement all the actions to perform when a graphical component issues an event; all these graphical components are implemented in the GUI containers and they allow parameterizing the EVP position estimation approach used, as well as configuring the EVP software tool. Also, the data processing packages include the ORB- SLAM main thread, the plotting tools, and different support classes to communicate results with other packages.

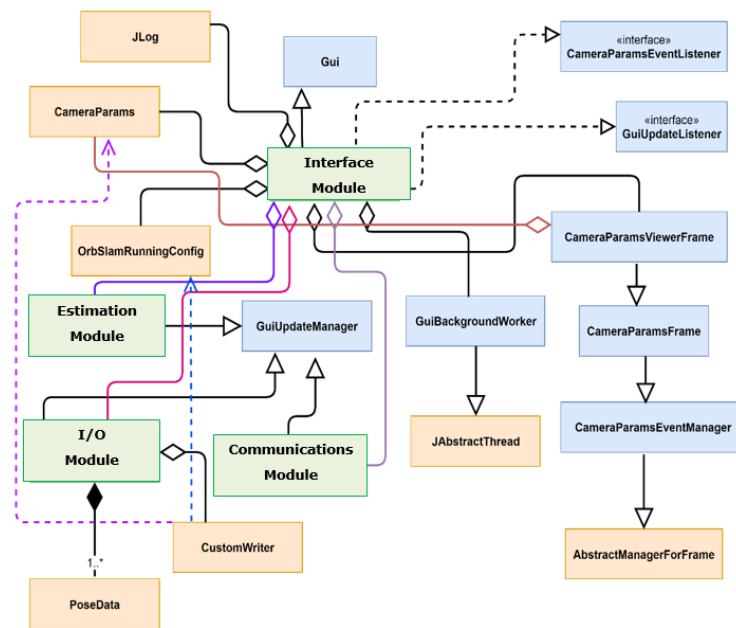
All the communications sent and received by the EVP GUI in the base station are issued by the smartphone in the drone. An Android application was also developed, and its functional and non-functional requirements are listed below:

- *Functional requirements:* users can enable or disable the communication module. The EVP app is able to communicate using a wireless link to the base station; it app must acquire





(a)



(b)

Figure 2. a) Conceptual diagram of the EVP base station software tool; b) EVP station base class diagram

images using the smartphone camera; and it must be able to send the images acquired and receive the estimated position of the drone from the base station.

- *Non-functional requirements:* Android studio version 2.0 is used to develop the EVP app. The development language is Java 7, update 121. To acquire and pre-process the images, OpenCV 3.0 is used. A flight controller based on Java running on the smartphone is used.

Fig. 3a shows the conceptual diagram of the EVP app’s mobile station. It runs on the smartphone, which is also in charge of flight control. The EVP app is remotely executed explicitly by users,

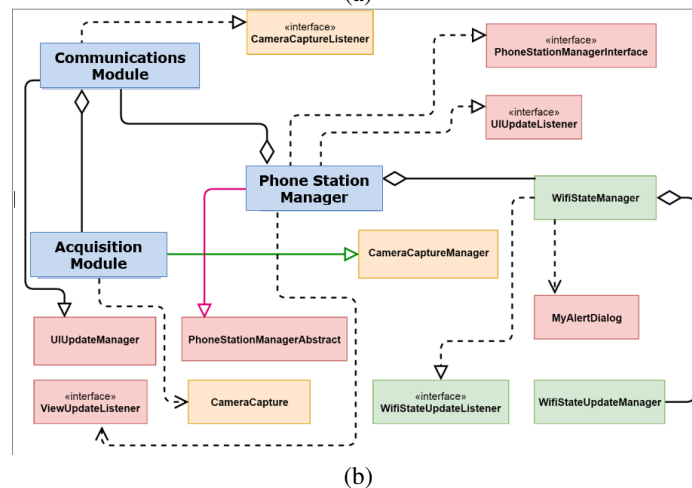
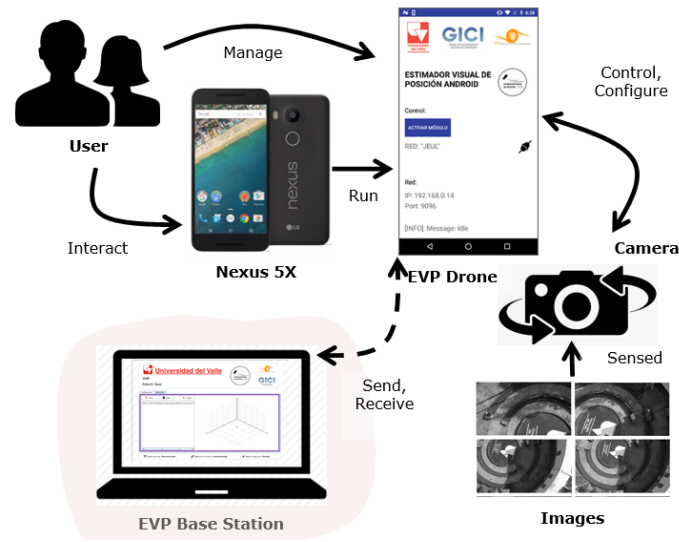


Figure 3. a) Conceptual diagram of the EVP mobile station software tool; b) EVP app class diagram

and they must also enable or disable the communication module. Afterwards, if users enable the communication module, the data acquisition begins, sending images to the base station to estimate the drone's position. This is due to the fact that the smartphone in the drone does not have enough CPU power to perform this calculation.

Considering the functional requirements of the EVP app and the conceptual diagram described above, the implementation of this EVP app was in accordance with the class diagram depicted in Figure 3b. In this Figure, it can be observed that three different packages were implemented: camera handling (yellow boxes), wireless link handler (green boxes), and miscellaneous tools (red boxes). The EVP app was implemented considering two modules and the main program. These two modules are the communication and data acquisition modules, which use the packages mentioned above to perform their tasks. It must be added that the EVP app's main program is in charge of integrating all Android-based activities.

4.2. Description of the EVP software tool

As mentioned before, the EVP software tool has two main parts, and the interaction between the user, the EVP base station, and the EVP app assumes the following process:

1. The user starts the EVP base station software tool and the EVP mobile station on the smartphone.
2. The user configures the flight parameters using the EVP base station and sends them to the EVP mobile station.
3. The user starts the flight mission manually and then remotely enables the position estimation module in the EVP app.
4. The EVP mobile station starts receiving telemetry data and images from the quadcopter (mobile station). Then, the EVP base station computes the quadcopter's position, visualizes the results, and sends the estimated position to the quadcopter. This data exchange takes place during the flight mission.

Fig. 4 shows the EVP base station's GUI, which implements the functional requirements described in section 4.1. It is divided in three main parts: the first panel (green rectangle) shows the institutional logos; the second panel (red rectangle) allows users to configure the wireless link to the quadcopter, the folder where all data collected will be stored, and the basic ORB-SLAM parameters (the number of image features to detect, the number of decomposition levels for each image feature, the scale factor at each decomposition level for each image feature, the minimum initial number of features detected, and the minimum number of features detected in subsequent pair of frames); and a status panel (blue rectangle) where the wireless link and the communication and running status are shown.

An important aspect of the configuration panel in Figure 4 is defining the camera parameters. This is done by using the "Establish Camera Parameters" button. Then, a dialog shows up to modify the intrinsic camera parameters, the distortion coefficients, the FPS, and the color space used.

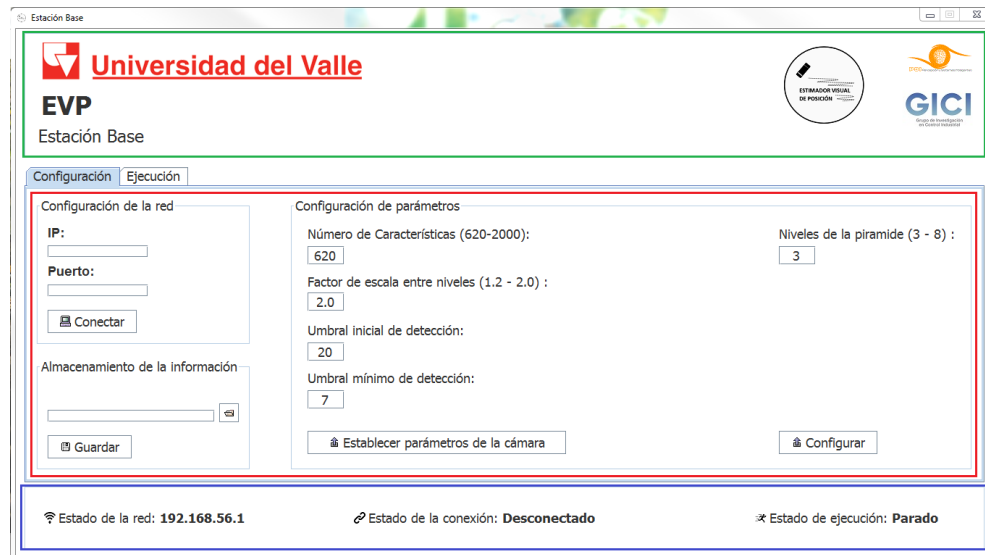


Figure 4. EVP base station GUI, configuration module

Afterwards, by clicking on the “Configure” button, all this information is stored in the base station and sent to the flight controller in the quadcopter’s smartphone. Afterwards, the position estimation algorithm of the quadcopter in the base station can be started.

At this point of the process, the user manually starts the flight mission and enables the position estimation module in the EVP mobile station. To this effect, Fig. 5a shows the EVP mobile station GUI, where the user selects the wireless network name and configures the communication port. The EVP base station and mobile station exchange data using a client/server communication. Once the communication is established, the EVP mobile station is activated, and it remotely enables the position estimation system.

Once the position estimation system is running in the base station, raw data is exchanged between the EVP base and mobile station using the frame structure depicted in Fig. 5b. This data frame is used to notify different events such as: connection/disconnection of the EVP mobile station, enable/disable commands for the position estimation system, and EVP status. At running state, the EVP mobile station continuously sends *image data* to the EVP base station at a fixed 640x380 resolution. Then, the EVP base station computes the quadcopter’s position and sends it back to the EVP mobile station using the *position data* field. This field contains the translation vector (t_x, t_y, t_z) and the unit quaternion (q_w, q_x, q_y, q_z) , which describes the current quadcopter’s position in space.

At the same time, in the EVP base station, users have all the corresponding functionalities, as shown in Fig. 6. In this Figure, users can start or stop the position estimation system, which agrees with the remote enable/disable functionality in the EVP mobile station. Also, users can visualize the current position of the quadcopter, and this position can be plotted in the EVP base station.

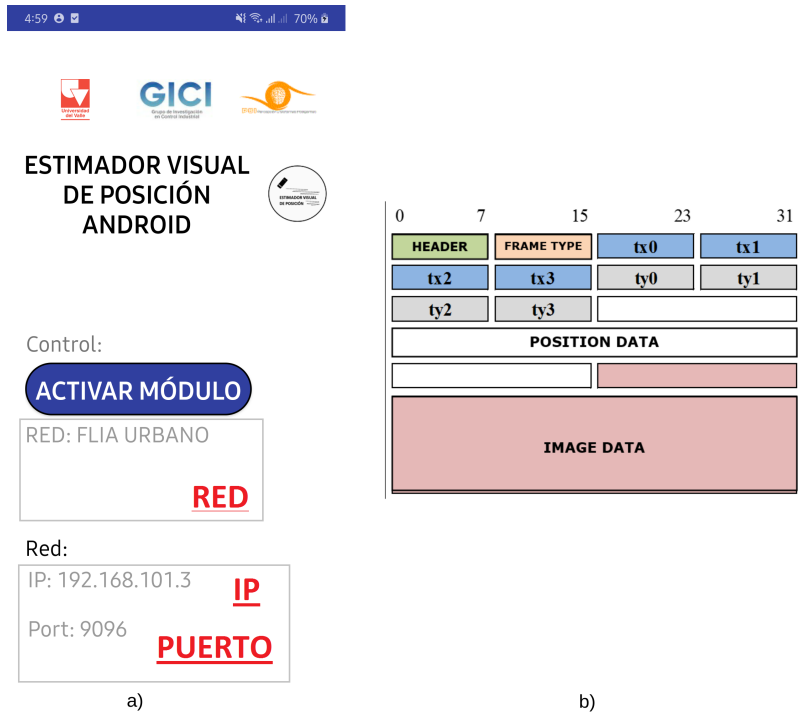


Figure 5. a) EVP app GUI; b) communication data frame structure

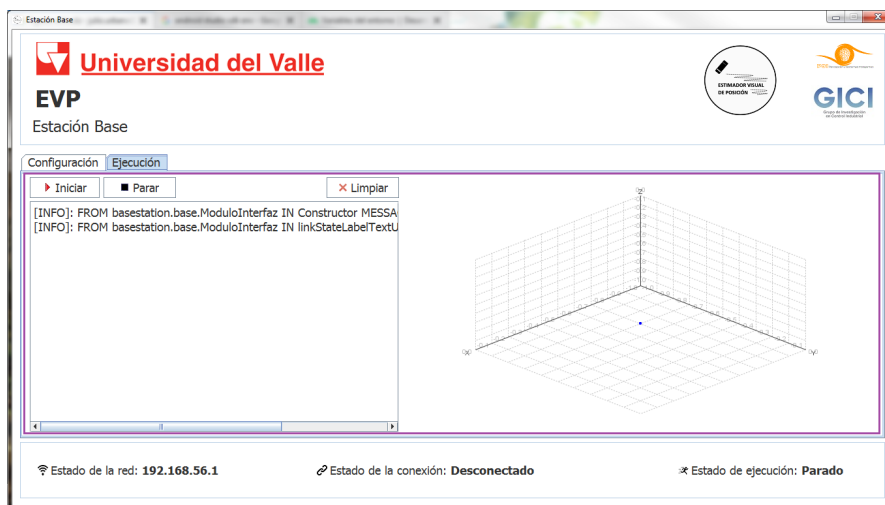


Figure 6. EVP base station GUI, position estimation module

Afterwards, the drone's position is sent to the quadcopter.

Users can also observe a text log with all communication events during the flight mission. Finally, status information is shown at the bottom of the GUI, as depicted in Fig. 4.

5. Test and results

The experimentation platform is presented in Fig. 7. The hardware and software of this platform was designed and implemented in the context of [4]. As observed in Fig. 7, the smartphone (LG Nexus 5X, Android Nougat 7.1.1), which runs robust and optimal flight controllers, is placed below the quadcopter. The quadcopter used has a carbon fiber LJI 500-X4 frame. Moreover, the quadcopter has a radius of 0,3 m and a weight of 450 g, and it can lift a payload of 250 g. Also, this smartphone is running the EVP mobile app described in section 4. The smartphone's camera is facing downwards to capture the images used to estimate the quadcopter's position.

The position estimation performed by the ORB-SLAM algorithm in the base station needs the camera calibration parameters. These parameters are listed as follows: the camera focus $f_x = 494,081,41$, $f_y = 494,161,57$; the main point is located at $c_x = 319,852,28$ and $c_y = 173,561,74$; and the distortion parameters are $k_1 = 0,040,01$, $k_2 = -0,090,02$, $k_3 = 0,000,00$, $p_1 = -0,0140,001$, and $p_2 = 0,000,00$. These parameters were obtained using the Bouguet Matlab toolbox [21].

In this section, the results of three different tests are presented. First, the EVP software tool was tested using only the smartphone and describing a known circular indoor trajectory. The aim of this test was to check the position estimation functionalities in a controlled indoor environment. Second, an open field test was performed with the aim of validating the position estimation approach in low textured outdoors environments with EVP. Finally, a field test was conducted with the aim of checking the EVP position estimation in more textured outdoor environments. In all these tests, the EVP base station software tool was executed in a laptop Dell Vostro 3500, with an Intel Core i5 CPU, 6Gb of RAM, and running Ubuntu 16.04 LTS Xenial.

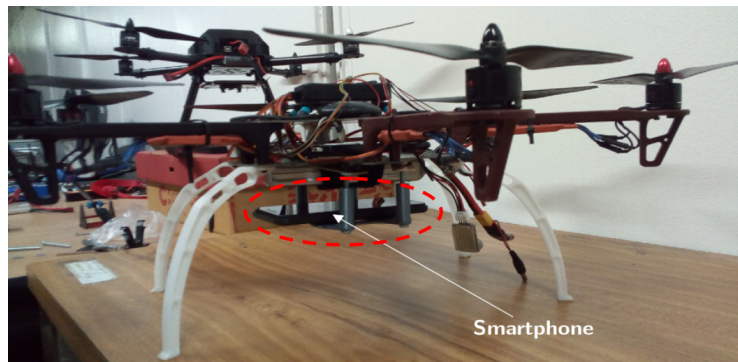


Figure 7. Quadcopter and the relative position of the smartphone (facing downwards)

Fig. 8a shows images captured using the LG Nexus 5X smartphone, which describe a circular motion using a monopod support. The smartphone and the support were moved by hand along a circular trajectory painted on the ground with a 2,2 m radius. As observed in Fig. 8a, this test was performed indoors in a semi-structured environment. Fig. 8b shows the trajectory estimated by EVP in red, as well as the ground truth in blue. Additionally, the X and Y estimated position errors are depicted in Fig. 8c.

By observing these figures, it can be seen that the EVP-estimated trajectory is very similar to the ground truth, which shows promising results in estimating the smartphone's trajectory indoors. At the very beginning, there is a high cumulative error, which is reduced along the trajectory, thanks to the local bundle adjustment methods implemented in ORB-SLAM. This is also shown in Fig. 8c, where the XY error graphs have noticeable deviations in the initial part of the circular path. In this test, the root mean square error along the estimated trajectory was 0,166 m.

Fig. 9a shows images captured from the drone's point of view during the open field test. This flight took place in the football field of Universidad del Valle, Cali, Colombia, covering an area of approximately 27 x 28 m. It is worth noting that the drone was not flying autonomously; it was manually controlled. As it can be observed in Fig. 9a, the captured images are low-textured, which poses a serious challenge for the position estimation algorithm implemented into the EVP software tool. Additionally, these images show the worst-case scenario. The ground truth in this test was obtained using a GPS-RTK system with an accuracy of 0,5 m. However, GPS-RTK systems do not have a high sampling frequency in comparison with the ORB-SLAM implemented into the EVP software tool.

Fig. 9b shows the resulting trajectory in the open field test in blue, as well as the GPS-RTK positioning in red. This Figure shows a closed trajectory which starts at approximately (-22,5 m, 10 m), since the GPS-RTK base station was located at (0, 0). In general, the software-estimated trajectory has a similar shape to the GPS-RTK trajectory. However, the last parts of these trajectories differ from each other due to the cumulative errors in the EVP-estimated trajectory, since the images taken from the drone's point of view are very homogeneous and low-texture. Therefore, perceptual aliasing is high. This is a tough situation that many SLAM solutions cannot solve without combining other types of sensors. Also, in Fig. 9c, an error plot is depicted. This error plot corresponds to the cumulative error in X and Y along the trajectory. By using these readings, the root mean square error of the whole trajectory was 2,8 m, which is less compared with common positioning errors in GNSS mobile networks [22].

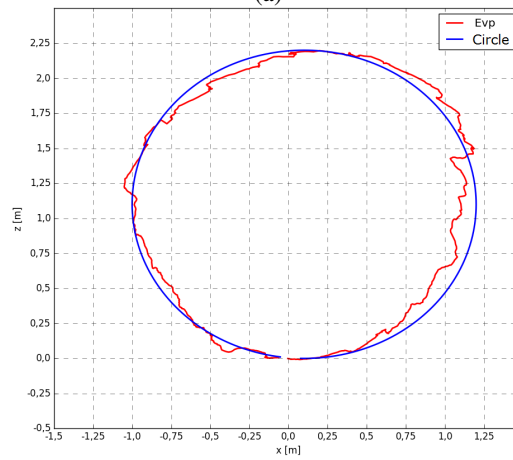
The third test was performed in the Engineering Department's small square at Universidad del Valle. In this test, images with a richer texture, in comparison with the second test, were acquired (Fig. 10a). This test covered an area of approximately 27,5 x 9 m. Again, the drone was not flying autonomously.

Fig. 10b shows the estimated trajectory computed by the EVP software tool in blue, and the ground truth using GPS-RTK in red. The quadcopter starts flying in the bottom right corner, and then it moves right. Fig. 10b shows a reduction in the estimation error, as observed in Fig. 10c. Again, due to cumulative error, the upper section in Figure 10b shows an increase in the relative

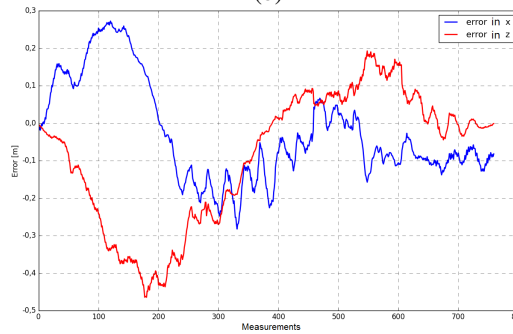
position error.



(a)



(b)

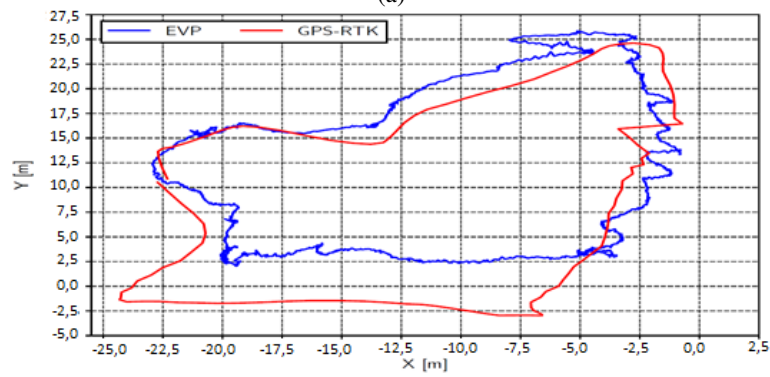


(c)

Figure 8. a) Some images obtained from the smartphone's point of view when performing the circular trajectory; b) circular trajectory estimated by EVP in red and ground truth in blue; c) trajectory error



(a)

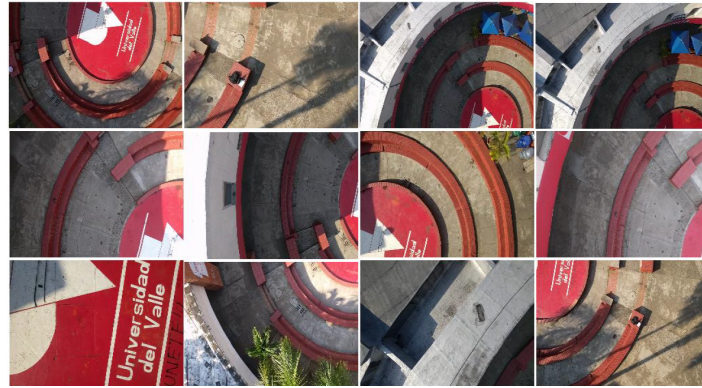


(b)

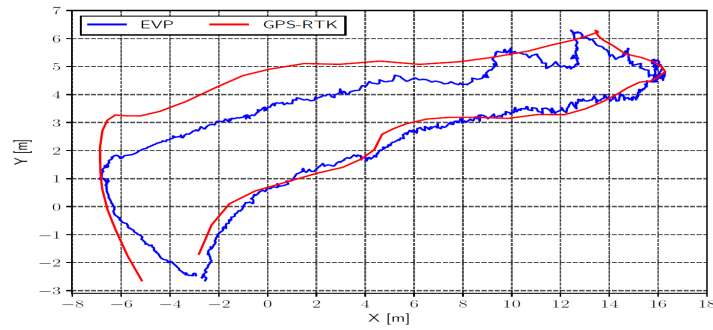


(c)

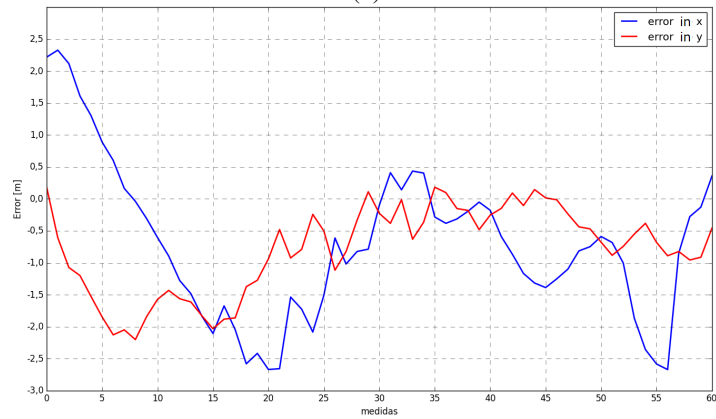
Figure 9. a) Some images obtained from the drone's point of view when performing this trajectory; b) trajectory in open field estimated by EVP in blue, and ground truth obtained from GPS-RTK in red; c) Trajectory error vs. number of measures over time



(a)

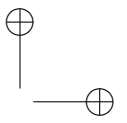
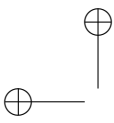


(b)



(c)

Figure 10. a) Some images obtained from the drone point of view when performing this trajectory; b) Trajectory along the roundabout of Engineering Faculty estimated by EVP in blue, and ground truth obtained from GPS-RTK in red; c) Trajectory error Vs. number of measures over time



In general, the EVP-estimated trajectory has a similar shape in comparison with the GPS-RTK trajectory. Using the error plots in Figure 10c, the root square error of the entire trajectory was computed, and it resulted in 1,4 m. This improvement was due to the richer image texture used by EVP to compute the drone's position. In these situations, the ORB-SLAM approach can estimate better relative drone positions in comparison with the second test described above.

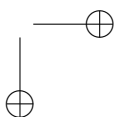
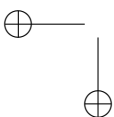
The related works show quantitative results that can be compared with the results obtained in this work. In [6], the authors report tests in an indoor area of 3 x 4 m with localization errors of up to 0,0127 m. Additionally, they perform outdoor tests over a 180 m path with localization errors of up to 2,2m. In [9], the authors perform an indoor test over a 12 m path with localization errors of up to 0,84 m. In [11], the authors report localization errors of up to 35 % of a path performed in an outdoor area of 250 x 150 m. In [10], the authors perform an indoor test in an area of 39 x 21 m with localization errors of up to 10 m. In [16], the authors report results with localization errors of up to 2,8 m using tests in an indoor area of 15 x 8 m. In [8], the authors report results of localization errors of up to 0,148 m in an area of 3 x 4 m, and errors of up to 1,7 % in indoor navigation. More relevant results are presented in [13], where the authors perform indoor tests in rooms with area of 11 x 5,5 m. The tests reported localization errors of up to up 0,3 m. Also in [17], localization errors of up to 2,6 cm in outdoor paths of up to 15,5 m is reported.

Considering the quantitative results described above, the most accurate results correspond to tests performed indoors and in small areas (errors of up to 0,3 m). Furthermore, tests over large areas or large non- closed paths have high localization errors (up to 10 m or 35 % of the path length). In this work, indoor tests reported localization errors up 0,166 m in an area of 15 m². Additionally, localization errors of up to 2,8 m were reported in a football field with low-texture information and covering an area of 25 x 27,5 m. The test performed in the Engineering Department square reported localization errors of up to 1,4 m in an area of 23 x 8,5 m. Therefore, considering the quantitative results obtained, EVP is a software tool that outperforms the reviewed results. EVP is an option to keep in mind in outdoor applications that need position estimation using vision sensors in GPS-denied environments.

6. Conclusions

In this work, the EVP software tool was presented. It was developed in two parts: the EVP base station and the EVP mobile app. In the EVP base station, users can configure the flight parameters, the ORB-SLAM parameters to estimate the drone's position, and the communication link with the drone to receive the remote captured images and telemetry data; as well as visualizing the drone's estimated position. In the EVP mobile app, users can configure the network parameters to communicate data to the EVP base station, as well as enabling the position estimation module and receiving estimated drone position from the EVP base station.

The position estimation method used was the ORB-SLAM for monocular cameras. Using this implementation, the EVP software tool does not need any artificial landmarks in the environment nor calibration patterns to track and estimate the drone's position. Additionally, the EVP software tool does not need any previous knowledge of the environment to estimate the drone's position in



space using 6DOF. However, according to the tests performed and their results, it is very important to have high-textured images of the environment to obtain good position estimation results.

The EVP software tool was tested using three different experiments: first, using the smartphone only, and describing a circular indoor known trajectory; second, an open field test was performed in the main football field of Universidad del Valle; and third, another field test in the Engineering Department's small square at Universidad del Valle. In the first experiment, the EVP software tool obtained an RMS error of up to 0,166 m in comparison with a ground truth circular trajectory of 2,2 m diameter painted on the ground. In the second and third experiments, the EVP software tool obtained an RMS error of up to 2,8 m and 1,4 m, respectively, in comparison with a ground truth trajectory using GPS-RTK. The RMS error in the third experiment was lower in comparison with the second field experiment, since images reported from the drone are richer in texture. These quantitative results were compared with those reviewed in the literature. As a result, EVP is an option to keep in mind in outdoors applications that need position estimation using vision sensors in GPS-denied environments.

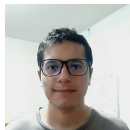
Finally, future works include merging the image data with inertial sensors to adjust and reduce position estimation errors due to oscillations or sudden motions during flight. Also, the EVP position estimation could be completely implemented into the smartphone. In this way, the communication load due to continuous image transmission from the drone to the base station will be minimized, which enables the use of this kind of solutions in real-time applications.

References

- [1] S. Bianco, G. Ciocca, and D. Marelli, "Evaluating the Performance of Structure from Motion Pipelines," *J. Imaging*, vol. 4, no. 8, p. 98, Aug. 2018. <https://doi.org/10.3390/jimaging4080098> ↑285
- [2] M. O. A. Aqel, M. H. Marhaban, M. I. Saripan, and N. B. Ismail, "Review of visual odometry: types, approaches, challenges, and applications," *Springerplus*, vol. 5, no. 1, p. 1897, Dec. 2016. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3573-7> ↑285
- [3] H. Durrant-whyte and T. Bailey, "Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM): Part I The Essential Algorithms," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 13, no. 2, pp. 99–110, 2006. <https://doi.org/10.1109/MRA.2006.1638022> ↑285
- [4] A. Astudillo, B. Bacca, and E. Rosero, "Optimal and robust controllers design for a smartphone-based quadrotor," in *2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, 2017, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/CCAC.2017.8276392> ↑286, 297
- [5] G. Klein and D. Murray, "Parallel Tracking and Mapping on a camera phone," in *2009 8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 2009, pp. 83–86. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2009.5336495> ↑287
- [6] J. Ventura, C. Arth, G. Reitmayr, and D. Schmalstieg, "Global Localization from Monocular SLAM on a Mobile Phone," *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 20, no. 4, pp. 531–539, Apr. 2014. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2014.27> ↑287, 302
- [7] M. Cao, L. Zheng, W. Jia, and X. Liu, "Fast monocular visual odometry for augmented reality on smartphones," *IEEE Consum. Electron. Mag.*, pp. 1–1, 2020. <https://doi.org/10.1109/MCE.2020.2993086> ↑287
- [8] L. Jin, H. Zhang, and C. Ye, "Camera Intrinsic Parameters Estimation by Visual-Inertial Odometry for a Mobile Phone With Application to Assisted Navigation," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 25, no. 4, pp. 1803–1811, Aug. 2020. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2020.2997606> ↑287, 302
- [9] S. Tomažič and I. Škrjanc, "Monocular Visual Odometry on a Smartphone," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 10, pp. 227–232, Jan. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.136> ↑287, 302

- [10] F. G and C. JM, "Indoor Localization using Computer Vision and Visual-Inertial Odometry,," *Comput. Help. People with Spec. Needs ... Int. Conf. ICCHP ... proceedings. Int. Conf. Comput. Help. People with Spec. Needs*, vol. 10897, pp. 86–93, Jun. 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94274-2_13 ↑287, 302
- [11] D. Agudelo España, D. Gil López, and S. Silva López, "Estimación de la localización de un vehículo usando un sistema de visión por computador," Universidad Tecnológica de Pereira, Grupo de Investigación SIRIUS, 2013. http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/4132/00637A282E_Anexo.pdf?sequence=2&isAllowed=y ↑287, 302
- [12] T. Schops, J. Engel, and D. Cremers, "Semi-dense visual odometry for AR on a smartphone," in *2014 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 2014, pp. 145–150. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2014.6948420> ↑287
- [13] M. Li, R. Chen, X. Liao, B. Guo, W. Zhang, and G. Guo, "A Precise Indoor Visual Positioning Approach Using a Built Image Feature Database and Single User Image from Smartphone Cameras," *Remote Sens.*, vol. 12, no. 5, p. 869, Mar. 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12050869> ↑287, 288, 302
- [14] Y.-H. Jin, K.-W. Ko, and W.-H. Lee, "An Indoor Location-Based Positioning System Using Stereo Vision with the Drone Camera," *Mob. Inf. Syst.*, vol. 2018, pp. 1–13, Oct. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/5160543> ↑287, 288
- [15] Z. Shang and Z. Shen, "Vision-model-based Real-time Localization of Unmanned Aerial Vehicle for Autonomous Structure Inspection under GPS-denied Environment," in *The 2019 ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering*, 2019, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1061/9780784482445.037> ↑287, 288
- [16] M. Werner, M. Kessel, and C. Marouane, "Indoor positioning using smartphone camera," in *2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, 2011, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/IPIN.2011.6071954> ↑287, 288, 302
- [17] F. Jabborov and J. Cho, "Image-Based Camera Localization Algorithm for Smartphone Cameras Based on Reference Objects," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 114, no. 3, pp. 2511–2527, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07487-9> ↑287, 288, 302
- [18] R. Mur-Artal, J. M. M. Montiel, and J. D. Tardos, "ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 31, no. 5, pp. 1147–1163, Oct. 2015. <https://doi.org/10.1109/TRO.2015.2463671> ↑288, 289, 290
- [19] E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, and G. Bradski, "ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF," *2011 Int. Conf. Comput. Vis.*, pp. 2564–2571, 2011. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126544> ↑288
- [20] P. Kruchten, *The Rational Unified Process: An Introduction*, 3rd ed. Addison-Wesley Professional, 2003. ↑291
- [21] J.-Y. Bouguet, "Camera Calibration Toolbox for Matlab," California Institute of Technology, 2013. [Online]. Available: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/ ↑297
- [22] M. Karaim, M. Elsheikh, and A. Noureldin, "GNSS Error Sources," in *Multifunctional Operation and Application of GPS*, InTech, 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75493> ↑298

Julio Urbano López Eng.



Electronic Engineer from Universidad del Valle, Cali, Colombia (2019). He is currently a Master's student at the same university. His main research interests are computer vision, mobile robotics, and automatic control systems.

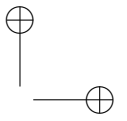
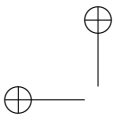
Email: julio.urbano@correounivalle.edu.co

Bladimir Bacca Cortes PhD.



PhD. in Technology from Universitat de Girona, Spain (2012); Master in Automation from Universidad del Valle, Cali, Colombia (2004). Bladimir Bacca Cortes is currently an Associate Professor at Universidad del Valle, where he has been working since 2005. He belongs to the Perception and Intelligent Systems research group of Universidad del Valle. His research interests include mobile robotics, computer vision, and simultaneous localization and mapping systems.

Email: bladimir.bacca@correounivalle.edu.co

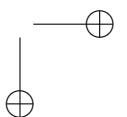
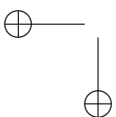


José Tomás Buitrago, M.Sc.



Master in Automation from Universidad del Valle, Cali, Colombia (1999). He is an Assistant Professor at Universidad del Valle. He belongs to the Industrial Control Research Group. His research interests include control engineering, industrial robotics, engineering didactics, and technology history.

Email: jose.buitrago@correounivalle.edu.co





Instrucciones para los Autores

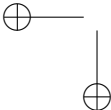
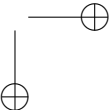
Introducción

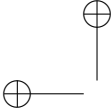
La Revista INGENIERÍA es una publicación de carácter científico con una periodicidad cuatrimestral editada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La Revista está dirigida a la comunidad académica, investigadores, egresados, sectores productivos y en general al público interesado en los temas del campo de la Ingeniería. Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la ingeniería a través de la publicación de artículos originales e inéditos, con pertinencia local o internacional.

Todo artículo es evaluado de manera doble-ciega por pares revisores antes de ser calificado como candidato para publicar. El Comité Editorial, tomando en cuenta los conceptos emitidos por los evaluadores y el cumplimiento de las políticas editoriales de la Revista, decide la publicación del artículo en una edición futura. Todos los artículos presentados a la revista INGENIERÍA deben ser inéditos. No se publicarán artículos que hayan sido anteriormente publicados o que hubieren sido sometidos por el autor o los autores a otros medios de difusión nacional o internacional para su publicación.

Clasificación de los artículos

La clasificación de un artículo científico dependerá de la naturaleza del nuevo conocimiento que reporte, lo que nos lleva a plantear la siguiente tipificación:

- **Investigación:** son aquellos que abordan una pregunta sobre un aspecto disciplinar teórico o aplicado, usualmente mediante un estudio científico del comportamiento de un fenómeno o una situación bajo ciertas condiciones de control.
 - **Metodología:** estudios enfocados en presentar un nuevo método de solución para una categoría particular de problemas, demostrando resultados favorables en comparación con el estado del arte o de la técnica. Son investigaciones específicamente dedicadas a validar las bondades y desventajas del método que proponen o a realizar caracterizaciones comparativas de varios métodos en dominios disímiles o inexplorados.
 - **Revisión:** los que presentan análisis críticos, sistemáticos, delimitados y exhaustivos, sobre los avances, tendencias, resultados positivos y negativos, vacíos y futuras rutas de investigación encontrados en el actual estado del arte o de la técnica.
 - **Perspectiva:** aquellos que, recurriendo a fuentes bibliográficas originales y con un discurso argumentativo y controversial, cuestionan el actual estado del arte o de la técnica, proponen visiones alternativas a las corrientes de pensamiento dominantes, critican la vanguardia de la disciplina o instigan un viraje hacia tópicos de investigación abandonados o desentendidos por la comunidad científica. Usualmente más que una reflexión personal, buscan establecer una posición colectiva (de comunidad científica), sustentada en una discusión que combina introspectiva, retrospectiva y prospectiva sobre el asunto en cuestión.
 - **Reporte de Caso:** los que buscan divulgar un hallazgo novedoso encontrado durante o posterior a un caso particular de desarrollo tecnológico, que eventualmente podría generalizarse mediante una investigación más amplia (aplicada a más casos) y que por lo tanto ameritan ser conocidos por la comunidad para convocarla en tal sentido. Más que
- 
- 



enfatar en el desarrollo tecnológico o innovación per sé, se enfocan en caracterizar el conocimiento descubierto en el caso de estudio respectivo.

- **Editoriales, Cartas al Editor, Artículo Invitado:** son las únicas categorías que no reportan nuevo conocimiento, sino que discuten temas de interés para la Revista, para su línea editorial o para su comunidad, con un carácter de opinión informada.

Para una mayor información de la explicación y/o diferencias de la anterior clasificación los invitamos a visitar el siguiente enlace “Guía breve de clasificación de artículos en INGENIERÍA”.
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/11131/12114>

Procedimiento para el envío de artículos

Los autores deberán enviar al Editor los siguientes documentos mediante la plataforma Open Journal System (OJS) de la Revista:

- Carta de presentación y originalidad del artículo: el formato de la presente carta se puede descargar en el siguiente enlace:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5087/11961> (Formato PDF)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/11486/12242> (Formato Word)
La finalidad de la carta es certificar que el artículo es inédito, que no está sometido a otra publicación y que aceptan las normas de publicación de la Revista.

- El artículo en formato digital utilizando la plantilla y las normas de presentación que se pueden consultar en el siguiente enlace (instrucciones a los autores):

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/4979/11816> (Formato PDF)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5233/11815> (Formato Word)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/9539/10775> (Formato Latex)

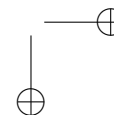
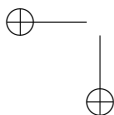
- Los autores relacionarán en el correo de postulación del artículo dos posibles evaluadores que cumplan las siguientes condiciones:

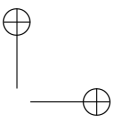
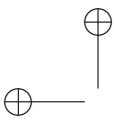
- Debe tener al menos título de maestría.
- Pertener a una institución diferente a la de los autores.
- Haber realizado publicaciones en los últimos tres años.

Nota: Enviar los datos de los contactos de los posibles evaluadores (nombre completo, institución y correo electrónico). Esta información también puede ser enviada a la siguiente dirección electrónica: revista_ing@udistrital.edu.co

- En caso de ser aceptado, los autores del artículo se comprometen a diligenciar el formato de cesión de derechos para publicación. Se puede descargar en el siguiente enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5091/6711>

Se puede consultar la guía rápida para autores en la plataforma OJS en el enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5540/7070>



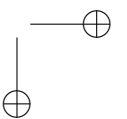
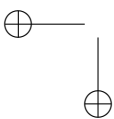


Aspectos a tener en cuenta

- Se considera un artículo largo cuando tiene más de diez (10) páginas con este formato. Por consiguiente se recomienda tener como límite diez (10) páginas para la elaboración de un artículo. El Comité Editorial podría solicitar a los autores reducir el tamaño del artículo cuando lo considere demasiado largo.
- Los resultados de las evaluaciones de los pares árbitros y las modificaciones que requiera el Comité Editorial serán notificados a los autores a través de la plataforma OJS y al correo electrónico del autor de correspondencia. Los autores deberán enviar nuevamente el artículo con las modificaciones sugeridas sin nombres y sin biografías. En general, este intercambio de sugerencias y modificaciones puede llegar a presentarse una, dos o más veces después de presentar el artículo.
- Cuando un artículo no cumple con las condiciones definidas para la revista, el Comité Editorial podría decidir no publicarlo. En este caso, el autor o los autores serán notificados de la decisión.

Derechos de autor

El contenido completo de la licencia Creative Commons, bajo la cual se resguardan los derechos de autor de aquellos que publican en la Revista INGENIERÍA, puede consultarse en: Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0.





Instructions for authors

Aim and scope

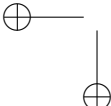
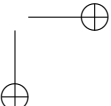
INGENIERÍA Journal is a scientific publication with a periodicity published every four months by Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Its main goal is to disseminate and discuss advances in research and development in the different areas of engineering through the publication of original unpublished papers.

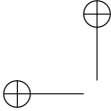
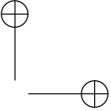
The intended audience of the Journal is the academic community, researchers, graduates, productive sectors and in general the public interested in all engineering disciplines.

Submitted papers are double-blind peer-reviewed by at least two experts in the field, before being qualified as a candidate to be published. The Editorial Board grounds its acceptance decision on the basis of the recommendations given by the experts and the fulfillment of the editorial policies of the Journal. All papers submitted to INGENIERÍA Journal must be unpublished and not submitted to publication to other journal, although papers previously published in conference proceedings may be considered if substantial extensions are included.

Types of papers

Papers published in INGENIERIA Journal are classified according to the nature of the new knowledge it reports, as follows:

- **Research:** These are papers that address a question about a theoretical or applied disciplinary aspect, usually through a scientific study of the behaviour of a phenomenon or a situation under certain control conditions.
 - **Methodology:** These are papers focusing on presenting a new method of solution for a particular category of problems, demonstrating favorable results compared to the state of the art or technique. They are investigations specifically dedicated to validate the advantages and disadvantages of the method proposed or to perform comparative characterisations of several methods in dissimilar or unexplored domains.
 - **Review:** These are papers that present critical, systematic, delimited and exhaustive analyzes on the progress, trends, positive and negative results, gaps and future research routes found in the current state of the art or technique.
 - **Perspective:** These are papers that, using original bibliographical sources and argumentative and controversial discourse, question the current state of art or technique, propose alternative visions to dominant currents of thought, criticise the vanguard of the discipline or call for the attention towards research topics abandoned or disregarded by the scientific community. Usually more than a personal reflection, they seek to establish a collective (scientific community) position, based on a discussion that combines introspective, retrospective and prospective on the subject in question.
 - **Case Report:** These are papers intending to disclose a novel finding found during or after a particular case of technological development, which could eventually be generalised by a more extensive investigation (applied to more cases) and which therefore deserve to be known by the community. In other words, rather than emphasising on technological development or innovation per se, they focus on characterising preliminary knowledge discovered in the respective case study.
- 
- 

- 
- 
- **Editorials:** Letters to the Editor, Guest Article: These are the only contributions that do not report new knowledge, but discuss topics of interest for the Journal, for its editorial line or for its community, with an informed opinion style.

Procedure for the submission of papers

Authors should submit to the Editor the following documents using our Open Journal System (OJS) platform:

- Cover letter and originality statement: a template can be downloaded from:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5087/11961> (PDF Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/11486/12242> (Word format)

- The manuscript formatted according to the template and style of the instructions to authors:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/4979/11816> (PDF Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5233/11815> (Word Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/9539/10775> (Latex Format)

- (Optional) Suggestions of two candidate experts for peer review, complying with:

– Must have a PhD. Degree

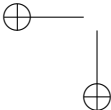
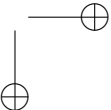
– Must belong to an institution other than the authors’

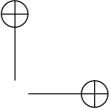
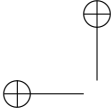
– Have publications in recognised journals in the last two years

- If accepted for publication, the authors must agree with and submit a copyright form that transfers rights for publication. This form can be downloaded from:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5091/6711>

Additional considerations

- Recommended paper length is ten (10) pages. If authors require more pages, they should inform the Editor in advance during the submission process.
 - The result of the review process and the reviewers comments would be notified to the authors through the OJS platform and by email to the correspondence author. The result can be “Major correction”, “Minor corrections” or “Rejected”. When corrections are required, authors should resubmit a corrected anonymous manuscript and a companion document explaining the changes made in reply to what comments. Usually, a submitted manuscript would undertake at least two rounds of review. Statistics of average review and production times and other Journal indicators can be seen at:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/index>
 - When a submission does not meet the conditions defined for the journal, the Editorial Committee may decide not to publish it. In this case, the authors will be notified of the decision within two (2) weeks from the date of submission.
- 
- 



Copyright and publishing cost

INGENIERÍA Journal distributes the full content of its printed and digital version under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License. No publication costs are charged to the author or author's institutions, nor any payment are made to expert peer reviewers or associated or adjunct editors. INGENIERÍA Journal is funded by Universidad Distrital Francisco José de Caldas, its School of Engineering and its Central Research Office.

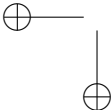
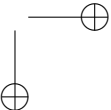
Code of good conduct in scientific publishing

INGENIERÍA Journal advocates and defends the universal principles of good conduct in scientific publication, in particular, those referring to respect for the community, respect for the selfless and voluntary work of peer reviewers and editors, as well as respect to intellectual property. Regarding the latter, INGENIERÍA Journal does not tolerate behaviours related to plagiarism of previously published material and strives to honor to the maximum extent the copyrights and patents and reproduction rights. Likewise, the Journal seeks to observe the moral rights of third parties, in addition it will establish the necessary processes to avoid and to resolve the possible conflicts of interest that can exist in the publications.

Inappropriate behaviour not tolerated by the journal

1. Wrongly addressed submission intended to other journal different to INGENIERIA Journal.
2. Plagiarism or self-plagiarism.
3. Simultaneous submission of a manuscript to several journals.
4. Unjustified withdraw of a submitted manuscript due to unfavourable reviews.
5. Unjustified abandonment of submission at any stage of the process: verification of submission conditions, peer-review process or layout and final proof adjustments.

Penalties for inappropriate behaviour

1. Official communication sent to the authors indicating the misconduct, requesting a letter of apology addressed to the Editorial Committee, Scientific and/or peer reviewers.
 2. Notification sent to the Colombian Network of Engineering Journals (Red Colombiana de Revistas de Ingeniería) reporting the case of misconduct with evidences.
 3. Official communication sent to author's affiliated or financing institutions informing about the misconduct.
 4. Retraction of the paper in case it has been published, notifying this decision publicly in the editorial pages of the Journal and in an official letter addressed to the entities of institutional affiliation of the authors.
 5. Application of a publication veto to the authors in the Journal during a period determined by the Editorial Board according to the seriousness of the misconduct.
 6. Notification of the case and the result of the investigation to the competent authorities, in case the good will of the Universidad Distrital FJC or the INGENIERIA Journal is compromised.
- 
- 



Procedure in case of suspicion of plagiarism and duplicate publication

INGENIERIA Journal will follow the guidelines established by the Publications Ethics Committee (COPE) to handle unethical issues or behaviours:

Suspicion of plagiarism in a submitted manuscript

<http://publicationethics.org/files/u7140/plagiarism%20A.pdf>

Suspicion of plagiarism in a published paper

<http://publicationethics.org/files/u7140/plagiarism%20B.0.pdf>

Suspicion of duplicate publication in a submitted manuscript

<http://publicationethics.org/files/u7140/redundant%20publication%20A.pdf>

Suspicion of a duplicate publication in a published paper

<http://publicationethics.org/files/u7140/redundant%20publication%20B.0.pdf>

For more information on non-ethical conduct and/or penalties please see:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/7784/11818>

