

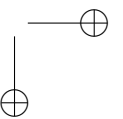
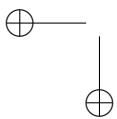
UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

REVISTA Ingeniería

Volumen 23 • Número 2 • ISSN 0121-750X • E-ISSN 23448393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL

2018



REVISTA Ingeniería

Volumen 23 · Número 2 · Año 2018 · 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 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.

EDITOR

Sergio A. Rojas, PhD.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

COMITÉ EDITORIAL

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

Diego Cantor, PhD.
University of Western Ontario
Robarts Research Institute, Canadá

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

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

Luz Esperanza Bohorquez, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Carlos Andrés Peña, PhD.
Institute for Information and Commu-
nication 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

Victor 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

Marco Aurelio Alzate, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

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

Ana María Peña, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Rodrigo Herrera, MSc.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Henry Alberto Diosa, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Edwin Rivas, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

DIRECTIVAS

Ricardo García Duarte
Rector

Nelson Libardo Forero Chacón, PhD.
Director Centro de Investigación
y Desarrollo Científico

Carlos E. Montenegro Marín, PhD.
Decano de la Facultad de Ingeniería

PREPARACIÓN EDITORIAL

Carolina Suárez R., MSc.
Gestora Editorial

Jenny Alexandra Jimenez, MSc.
Corrección de Estilo

Julian Arcila-Forero, MSc.
Diagramación **L^AT_EX**

Imagen Editorial
Impresión

ÁRBITROS EN ESTA EDICIÓN

Álvaro Ángel Orozco Gutiérrez, PhD.
Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia

Sergio Rivera Rodríguez, PhD.
Universidad Nacional de Colombia

Diego Cantor, PhD.
University of Western Ontario Robarts Research
Institute, Canadá

Melissa Aguas de Hoyos, MSc.
Universidad Nacional de Colombia

Jose Fidel Torres Delgado, PhD.
Universidad de los Andes, Colombia

Julio César Londoño Ortega, MSc.
Universidad del Valle, Colombia

Andres Felipe Osorio Muriel, PhD.
Universidad ICESI, Colombia

Juan Carlos Figueroa, PhD.
Universidad Distrital F.J. de C. Colombia

Sergio A. Rojas, PhD.
Universidad Distrital F.J. de C. Colombia

PERMISO DE REPRODUCCIÓN

Open access



Los textos de los artículos incluidos en esta edición pueden ser utilizados y reproducidos con fines sin ánimo de lucro y dando crédito a los autores. Está trabajo se distribuye bajo la Licencia de Creative Commons

Reconocimiento – No comercial – Sin Obra Derivada 3.0 Unported.

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



CARÁTULA

La portada está inspirada en el artículo sobre almacenamiento de energía solar publicado en este número; es una alegoría sobre la importancia del aprovechamiento de recursos energéticos alternativos para la preservación del planeta.

Idea creativa y Diseño Gráfico:
Sergio A. Rojas y Julian Hernández

TABLE OF CONTENTS

Editorial

- Cerrar ciclos, suscitar espirales** 113
Cycles eliciting spirals
Sergio A. Rojas

Industrial Engineering

- Inventory Routing Problem in perishable supply chains: A literature review** 117
El Problema de Ruteo e Inventarios en Cadenas de Suministro de Perecederos: Revisión de Literatura
Diego Fernando Batero Manso · Javier Arturo Orjuela Castro

Environmental Engineering

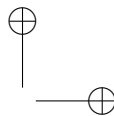
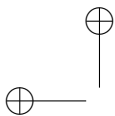
- A Survey of Materials for Solar Thermal Energy Storage** 144
Una Revisión sobre Materiales para Almacenamiento de Energía Solar Térmica
Debrayan Bravo Hidalgo

Computational Intelligence

- Forecasting Latin-American Currency Exchange using Models with Static and Stochastic Volatility** 166
Pronóstico de divisas latinoamericanas con modelos de Volatilidad Estática y Estocástica
Laura Camila Roldán Martínez

- New Algorithms for $\delta\gamma$ -Order Preserving Matching** 190
Nuevos Algoritmos para Búsqueda de Orden $\delta\gamma$
Juan Mendivelso · Rafael Niquefa · Yoan Pinzón · Germán Hernández

- Instructions for Authors** 203



Cerrar ciclos, suscitar espirales

REVISTA Ingeniería

Hace poco me encontraba frente al computador elaborando el borrador de una de las recientes carátulas de la *Revista*, que trataba sobre una postal hipotética del planeta Tierra visto desde la superficie solar. Sucedió que mi hijo de ocho años al verme, con una gran curiosidad me preguntó qué estaba haciendo. Le respondí: “trabajo en un dibujo para inspirar a las personas a hacer del mundo un lugar mejor; es una metáfora. ¿Recuerdas que el otro día estudiamos lo que significaba una metáfora?”. Asintió vacilante, quizás porque no recordó lo que significaba; pero en cambio exclamó entusiasmado: “¡yo también quiero trabajar como tú!” e inmediatamente fue por papel y colores, y comenzó a garabatear y pintar su propio dibujo, que con su gracia infantil, percibí más sincero, más audaz, más colorido que el mío. Entendí que en ese momento había logrado inspirarlo, que durante ese instante el mundo fue un poquito mejor y que episodios como este eran pequeñas recompensas inesperadas para mi trabajo como editor de revista científica.

Precisamente durante este tiempo como Editor de la *Revista INGENIERÍA* he tenido la fortuna de reconfortarme con varias de estas pequeñas recompensas inesperadas, encontradas en palabras de autores, de evaluadores, de editores y lectores, que han hallado en esta labor motivos de gratitud, de reconocimiento y sobre todo, de motivación. A pesar de que el oficio de editor es muchas veces incomprendido y subvalorado, como lo he expresado en varias ocasiones [1], aquellos que lo asumimos con pasión sabemos que nuestro trabajo discretamente contribuye a consolidar los espacios idóneos (transparentes, imparciales, diligentes, atentos, distintivos) a fin de que los investigadores puedan comunicar sus avances; esos que en una medida u otra, contribuyen a hacer del mundo un lugar mejor.

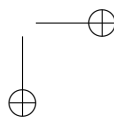
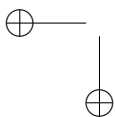
Lastimosamente en este mismo rol también he tenido que enfrentar grandes decepciones, reclamos infundados, valoraciones injustas de los logros de la *Revista* y más recientemente, el devenir del cierre de mi ciclo como editor de esta, no por voluntad propia sino por designio intempestivo y unilateral de parte de las autoridades administrativas de la Universidad.

He procurado asumir esta última afrenta de manera estoica, buscando explicación en las dinámicas propias del servicio público, caracterizadas por ciclos periódicos de gestión a través de los cuales las instituciones prevalecen sobre los funcionarios que las presiden. Y dado que considero que uno de los mejores logros alcanzados por la *Revista INGENIERÍA* ha sido forjar su ins-

Open access



Citación: S. Rojas, “Cerrar ciclos, suscitar espirales”, *Ingeniería*, vol. 23, no. 2, pp. 113-116, 2018.
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.13388>



titudinalidad como medio respetable de comunicación científica dentro de la Universidad, confío en que los aciertos, desatinos y expectativas enmarcados dentro de mi gestión, contribuyan no a cerrar un ciclo, más bien a suscitar un espiral de crecimiento que la conduzca a consolidarse en el lugar que se merece. Dicho ciclo abarcó innovaciones, traspies y perspectivas, que a manera de balance, me permitiré resumir y comentar brevemente a continuación.

Comenzaré por el plano de las innovaciones, que considero han aportado positivamente al crecimiento y reconocimiento de la *Revista*:

- Cambio de tamaño y formato de maquetación (2010), implementación del sistema OJS para gestión de contenido y revisión por pares en línea (2012) y diseño de plantillas de autor en LaTeX (2013);
- Primera revista de ingeniería colombiana en adoptar el resumen estructurado [2], organizado acorde con las siguientes unidades informativas etiquetadas: Contexto, Métodos, Resultados, Conclusiones, Palabras clave, Agradecimientos (vigente desde 2016).
- Indexación en las siguientes bases de datos bibliográficas: DOAJ (desde 2016), EBSCO (desde 2014), Google Scholar (desde 2015), Redalyc (desde 2017), Scielo (desde 2015), Pubindex B (dic. 2014- sep. 2017);
- Fortalecimiento de criterios editoriales para asegurar estándares más altos de divulgación científica; en el año anterior, 2017, la tasa de aceptación fue del 45 %, la proporción de autores externos a internos fue del 51 %, la proporción de revisores externos a internos fue del 83 %, el tiempo promedio de evaluación fue de ocho semanas, el tiempo promedio de producción fue de 12.6 semanas;
- Aumento de frecuencia de publicación a trianual (desde 2016); aplicación de filtro anti-plagio Turnitin durante la postulación (desde 2015); asignación de sistema de identificación DOI para garantizar mayor visibilidad y acceso permanente (desde 2015);
- Cumplimiento de publicación oportuna y además anticipada al calendario de publicación desde Vol. 20, Num.1 (2015); emisión periódica de boletines de noticias con novedades y estadísticas de cada número (desde 2014);
- Re-tipificación de artículos aceptados por la revista [3]: Investigación, Metodología, Revisión, Perspectiva, Reporte de Caso, Editoriales, Cartas al Editor, Artículo Invitado (2016); organización del contenido por secciones temáticas (2016), [4].
- Aumento sostenido de las citas recibidas por la *Revista* en los últimos años¹. Las estadísticas de citación, según Google Scholar son: 76 (2015), 162 (2016), 186 (2017), 43 (mayo de 2018), 560 (desde 2013), 695 (total), consultar [5] para mayor información.

¹En efecto, el estudio mediante técnicas bibliométricas de los indicadores de la *Revista* para el periodo 2010-2017, confirma un comportamiento de crecimiento positivo; tal estudio ha sido postulado para evaluación por pares, a la espera de una próxima publicación.

Ahora bien, en el plano de los traspiés, el más desolador fue el desconocimiento por parte de COLCIENCIAS del cumplimiento de la *Revista* respecto a los criterios de su nuevo modelo de evaluación, en la reciente convocatoria adelantada en mayo de 2017. Lo anterior con base en el absurdo argumento sobre la conveniente validación cruzada de la exogeneidad de los autores mediante el sistema CvLAC, una plataforma completamente ajena a Publindex donde la *Revista* no tiene injerencia alguna ni posibilidad de actualización de información. Ante tamaña injusticia, como lo anuncié en su momento [6], apelamos a la vía gubernativa, a la cual como respuesta luego de revisar el material impreso (que es exactamente el mismo digital que fue registrado en Publindex), COLCIENCIAS finalmente reconoció que la *Revista* en efecto cumple con los criterios de calidad para ser clasificada, pero caprichosa e inexplicablemente, se reafirma en que a pesar de ello, no procederá a revertir su decisión².

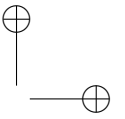
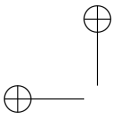
De cualquier modo, el hecho de que COLCIENCIAS haya reconocido el mérito de la *Revista INGENIERÍA*, así no haya tenido el decoro de oficializarlo, me da la tranquilidad personal de que este atropello no fue a causa de negligencia de mi gestión, sino a la incoherencia y porfía de los funcionarios encargados de dicha convocatoria. Sería inaudito por demás, que este hubiese sido el motivo que precipitase a las directivas de la Facultad a cerrar mi ciclo al frente de la *Revista*; prefiero intuir que no hubo suspicacia en el lacónico “se ha resuelto por esta nueva administración generar una nueva dirección para la revista”, que me fue notificado oficialmente.

Pasando al plano final, el de las expectativas, quedan varias ideas en remojo. Mencionaré algunas que, a manera de sugerencia, eventualmente puedan ser contempladas en los nuevos planes de la *Revista*: ampliación del espectro de ejes temáticos de interés; proyección regional hacia audiencias de países latinoamericanos; transición gradual a publicación en inglés; transformación a modelo de publicación incremental por artículo editado y producido; publicación exclusivamente en línea para evitar retrasos de impresión; consolidación y ampliación de secciones especializadas coordinadas por editores de sección expertos con reconocida trayectoria en sus áreas; realimentación periódica de crecimiento y desempeño mediante análisis bibliométricos; activación y operación rutinaria de redes sociales de la *Revista*, así como medición de indicadores alternativos de visibilidad; y por último, concepción de un modelo imparcial de unificación de revistas tanto endógenas como inter-institucionales.

Fueron ocho años transcurridos desde que inicié la honrosa labor de Editor General [7], lapso de crecimiento mutuo tanto de la *Revista* como de mi perfeccionamiento profesional, pues aprendí mucho más de lo que vislumbré cuando emprendí esta aventura. El conocimiento y pericia ganados en mi vocación editorial son por supuesto un aporte al capital intelectual de la Universidad Distrital FJC, y en tal sentido, estará a su entera disposición en caso de que sea considerado útil o beneficioso en nuevos escenarios que se avecinen.

Quisiera terminar expresando mi sincero agradecimiento a las personas que apoyaron y creyeron en esta propuesta; el espacio es muy corto para nombrarlos a todos, pero los editores, autores, evaluadores, los mismos lectores, los gestores y colaboradores que me acompañaron en las labores editoriales, sabrán que me refiero a cada uno de ellos al leer esta nota editorial. Que a propósito

²Como consta en oficio 20183000058023 de Marzo 05 de 2018 emitido por COLCIENCIAS.



revela cierta coloridad melancólica fuera de lo común para estos espacios y que pretendo me sea dispensada ante la desazón de la noticia, pues seguro no la tendría de haberse producido en circunstancias consensuadas. Al equipo editorial de relevo, encabezado por el profesor Nelson Díaz, le deseo afablemente la mejor de las suertes y renovado empeño. Sin más rodeos, me despido invitando a toda la comunidad académica a continuar respaldando a la *Revista*, a la que auguro aún mayor reconocimiento y prestigio futuro, como emblema de un encomiable triunfo colectivo.

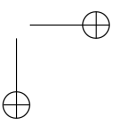
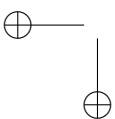
Bogotá, mayo 19 de 2018

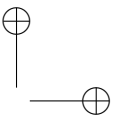
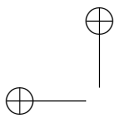
Sergio A. Rojas, PhD.

Editor Revista *INGENIERÍA*

Referencias

- [1] Rojas, S. A. “El Quehacer de los Editores: ¿Vocación o Profesión?”. *Ingeniería*, vol. 18, núm. 2, pp. 3-4, Jul. 2013. ↑113
- [2] Rojas, S. A. “Resúmenes estructurados: Rápidos y furiosos”. *Ingeniería*, vol. 20, núm. 2, pp. 163-166, Jul. 2015. ↑114
- [3] Rojas, S. A. “Guía breve sobre tipificación de artículos en *INGENIERÍA*”. *Ingeniería*, vol. 21, núm. 3, pp. 255-259, Sep. 2016. ↑114
- [4] Bohórquez, L.E.; Rojas, S. A. “Paz, complejidad e ingeniería”. *Ingeniería*, vol. 22, núm. 3, pp. 304-305, Sep. 2017. ↑114
- [5] Google Scholar, Perfil Revista *INGENIERÍA*, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2017. [En línea]. Disponible en: <https://scholar.google.com/citations?user=sUM9brMAAAAJ&hl=en> (Última consulta: mayo 19 de 2018) ↑114
- [6] Rojas, S. A. “Excluidos sin justa causa”. *Ingeniería*, vol. 23, núm. 1, pp. 4- 6, Ene. 2018. ↑115
- [7] Rojas, S. A. “Reingeniería a la Revista *INGENIERÍA*”. *Ingeniería*, vol. 15, núm. 1, pp. 3-4, Ene. 2010. ↑115





Review

Inventory Routing Problem in Perishable Supply Chains: A Literature Review

El Problema de Ruteo e Inventarios en Cadenas de Suministro de Perecederos: Revisión de Literatura

Diego Fernando Batero Manso¹ Javier Arturo Orjuela Castro^{*2}

¹SENA, ²Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

*Correspondence email: orjuela@udistrital.edu.co

Recibido: 16/11/2017. Modificado: 12/03/2018. Aceptado: 21/03/2018.

Abstract

Context: This paper presents a literature review of the Inventories Routing Problem (IRP) applied to supply chains of perishable products. Different approaches to solve this problem are identified and described in terms of structures, models and solution methods.

Method: A systematic literature review is conducted searching in different bibliographic databases and selecting the most relevant studies within the period 2004 to 2017. The results are analyzed so as to propose a taxonomy to classify and compare the different approaches proposed to address this problem.

Results: We identified that the majority of studies consider heuristic-based algorithms to solve the problem. Because of its computational complexity the methods resort to metaheuristics and mateheuristics combined with exact methods. Regarding the application to specific supply chains of perishable products, they refer mostly to processed foods, medicines, and human blood. The constraints that differentiate this problem from other types of IRP are useful life and deterioration.

Conclusions: The conditions and particularities of the supply chain of perishables products imply the need to consider new variables, parameters, constraints and objective functions; in the reviewed studies it is not clearly defined the differences involved when considering the perishability of the products in the supply chain. Future research should take into account the multiple ways in which deterioration is carried out with factors such as temperature, light, oxygen, humidity and in some cases microorganisms. Also include in the models the cold chain, hygiene standards, air pollution, emissions of greenhouse gases, generation of waste, occupation of roads and other aspects related to City Logistics and Green Logistics.

Keywords: Supply chain management, optimization, perishables, inventory routing problem, IRP.

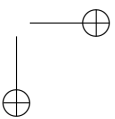
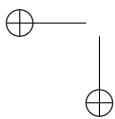
Language: Spanish



Cite this work as: D. F. Batero, J. A. Orjuela, "Inventory Routing Problem in Perishable Supply Chains: A Literature Review", Ingeniería, vol. 23, no. 2, pp. 117-143, 2018.

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

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.12691>



Resumen

Contexto: Revisión de literatura del problema de ruteo e inventarios (IRP) aplicado a las cadenas de suministro de productos perecederos. Se identifican y describen los diferentes enfoques en cuanto a estructuras, modelos y métodos de solución.

Método: Se realiza una revisión sistemática de la literatura en diferentes bases de datos bibliográficas y se plantea una taxonomía que clasifica las características de los estudios, lo anterior durante el período comprendido entre 2004 y 2017

Resultados: Se encuentra que la mayoría de algoritmos propuestos son de carácter heurístico. Debido a complejidad computacional inherente al problema, se usan metaheurísticas y mateheurísticas combinadas con métodos exactos. Se aplican principalmente en alimentos, medicamentos y sangre humana. Las restricciones que diferencian de otros tipos de IRP son las de periodo de vida útil y deterioro.

Conclusiones: Las condiciones y particularidades de la cadena de suministro de perecederos hace necesario que se planteen nuevas variables, parámetros, restricciones y funciones objetivo; por otro lado, en los estudios revisados no se establecen diferencias claras al involucrar la perecibilidad de los productos en los modelos. Las futuras investigaciones deberán tener en cuenta las múltiples maneras en las cuales se lleva a cabo el deterioro con factores como la temperatura, la luz, el oxígeno, la humedad y en algunos casos los microorganismos; asimismo, incluir en los modelos la cadena de frío, normas de higiene, contaminación del aire, emisiones de gases de efecto invernadero, generación de residuos, ocupación de vías y demás aspectos relacionados con *city logistics* y *green logistics*.

Palabras clave: Gestión de la cadena de suministro, IRP, optimización, perecederos, problema de ruteo e inventarios.

Idioma: Español

1. Introducción

El problema conjunto de ruteo e inventarios (IRP, por sus siglas en inglés, *Inventory Routing Problem*) tiene importancia en la gestión operativa de la cadena de suministro (CS) [1]. El estudio simultáneo de ruteo e inventarios es complejo, sin embargo, se ha demostrado que tiene un impacto mayor en el rendimiento global de la CS [2]. En la actualidad los modelos IRP consideran objetivos como la minimización de desperdicios de alimentos, uso de energía y emisiones [3].

Se realiza una revisión sistemática de la literatura del IRP para productos perecederos y, con base en su evolución histórica, se propone una taxonomía con respecto a la formulación matemática, los métodos y técnicas de solución propuestos. Se describen los modelos más importantes respecto a los problemas de aplicación.

En la segunda sección se presenta la metodología, en la tercera y la cuarta se analizan los modelos de inventarios y el problema de ruteo de vehículos (VRP, por sus siglas en inglés, *Vehicle Routing Problem*) para perecederos de forma independiente. La descripción del IRP y la taxonomía de modelos conforman la quinta sección, la cual está conformada por las subsecciones que describen los tipos de modelos y métodos de solución, la clasificación de variables de decisión, restricciones y los parámetros. Las conclusiones y los trabajos futuros se presentan en la sexta y séptima sección respectivamente.

2. Metodología

Para la elaboración de este artículo se realizó una revisión sistemática de la literatura, basado en la metodología propuesta por Aguinis y Glavas [4], según los pasos propuestos empleados por [5] que son buscar los artículos, revisarlos y clasificarlos, generar una taxonomía y establecer los tipos de modelos y sus características. Teniendo en cuenta lo anterior, se consultaron seis bases de datos: Scopus, IEEE ProQuest, MasterFILE Elite, Springer Link, ISI Web of Knowledge y JSTOR, así como el buscador de bibliografía Google Académico. En los artículos publicados en el periodo 2004 a 2017 se presenta una tendencia creciente de publicaciones sobre los problemas de ruteo e inventario de productos perecederos.

La primera revisión bibliográfica del IRP, se realizó con base en los artículos más relevantes, teniendo en cuenta los antecedentes y número de citaciones. El procedimiento consistió en identificar en el título, resumen y palabras claves las siguientes fórmulas de búsqueda: Food Supply Chain, IRP y VMI. La tendencia histórica de los artículos se presenta en la Figura 1.

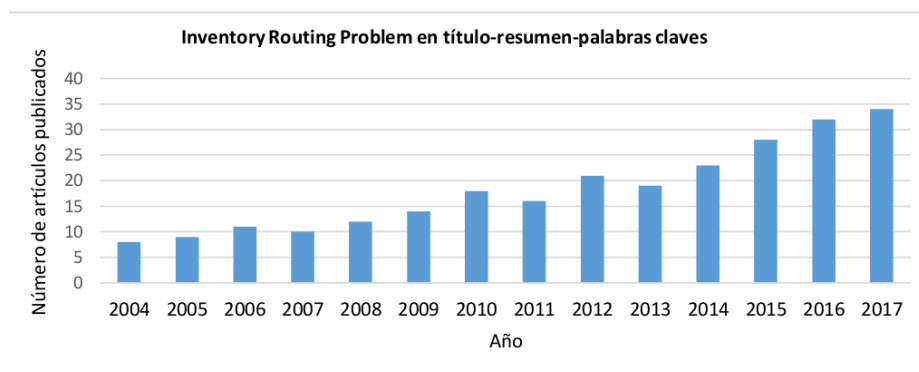


Figura 1. Número de artículos publicados en IRP en el periodo comprendido entre 2004 y 2017.

En una segunda búsqueda se incluyó la palabra “perishable” en las fórmulas de búsqueda, los artículos se redujeron a 47 (18,43 %) de un total de 255 obtenidos en la primera búsqueda, se presenta un incremento mayor en 2016-2017 (Figura 2).

Se realizó una tercera búsqueda que incluyó el término “food”, se referencian tres artículos en Scopus: [3], [6] y [7]. Respecto al IRP para sangre humana, se identifican dos artículos: [8], [9]. Con la palabra “frutas” o “fruta” un solo artículo lo aplica a higos y cerezas [10].

El objetivo de este documento es determinar el estado de la literatura en los estudios que han trabajado el IRP como marco de referencia para su aplicación a la logística de las CS de perecederos. Las preguntas planteadas fueron ¿cuáles son los modelos matemáticos y métodos de solución más representativos en problemas IRP?, ¿qué estructuras a nivel de variables, parámetros, restricciones y funciones objetivo existen en las aplicaciones de IRP?, y ¿qué medidas de desempeño logístico son usadas en el IRP para productos alimenticios perecederos?

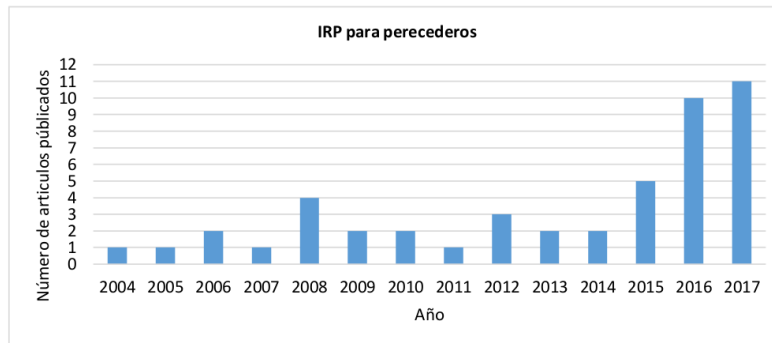


Figura 2. Gráfica de artículos publicados de IRP en perecederos 2004 y octubre de 2017.

3. Análisis de modelos de inventarios para perecederos

La gestión de inventarios ha generado modelos que toman como referencia el modelo de cantidad económica de pedido (EOQ, por sus siglas en inglés, *Economic Order Quantity*), el cual asume que los productos tienen vida útil ilimitada. Supuesto que no aplica en los productos perecederos [11], [12].

El 67 % de los artículos analizados por [15] consideran que el deterioro de los productos es a una tasa constante, como se observa en la Figura 3, lo cual aplica a algunos productos perecederos. Sin embargo, para los alimentos, y en especial las frutas, dicho supuesto no es completamente apropiado, pues en estos productos la condición de fresca, que disminuye gradualmente con el tiempo, influye en la demanda del producto [13], [14].

En [15] se clasifican ocho características distintivas en los sistemas de inventario: permiten periodos de desabastecimiento, consideran políticas de pago a proveedores, determinan una política de precios óptima, consideran sistemas multiniveles, tienen en cuenta el valor del dinero en el tiempo, consideran dos o más almacenes, estudian múltiples productos e introducen parámetros inciertos o difusos. El 60,40 % de los 303 artículos que analizan incluye solamente una, siendo la más frecuente que los modelos permiten periodos de desabastecimiento; no obstante, la mayoría los modelos revisados tienen como una de sus restricciones evitar el desabastecimiento. La menor parte de los artículos (2,64 %) incluye cuatro de las características listadas. Los resultados porcentuales de la cantidad incluida de características distintivas en los modelos, se muestran en la Figura 4.

En [16] se asume que la demanda se genera en fuentes finitas y el tiempo de vida de cada producto se supone como una función exponencial, como es el caso del modelo de revisión continua de inventario para perecederos, aplicado por [17]. El contexto son las tiendas y supermercados, se busca disminuir costos al minimizar la cantidad de residuos que se derivan de las pérdidas por fecha de vencimiento. Los resultados incluyen: reducción de los plazos de entrega, sustitución de la demanda y surtidos limitados. En [15] se resalta que solo un artículo hasta el 2013 considera una política óptima de inventario para varios eslabones de la CS, múltiples productos sujetos a deterioro y un adecuado sistema de información para un sistema multinivel.

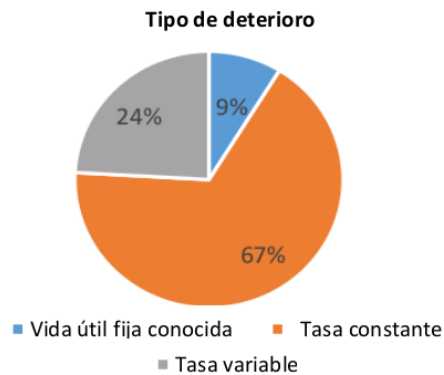


Figura 3. Gráfica que muestra el tipo de deterioro en productos perecederos. Fuente: elaboración propia a partir de [15].

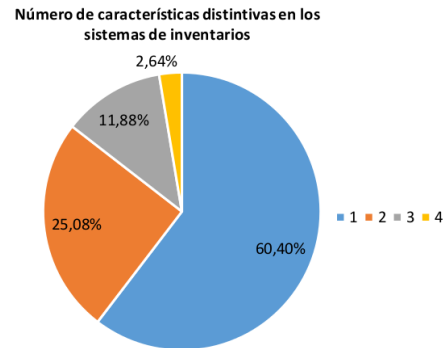


Figura 4. Gráfica consolidada de las características distintivas de los modelos de demanda conocida. Fuente: elaboración propia a partir de [15].

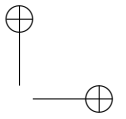
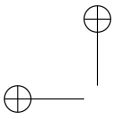
El trabajo de [18] proporciona estrategias de planificación de la CS con limitaciones de vida para productos sujetos a deterioro. Encuentran vacíos de investigación con respecto a tiempos de preparación y alistamiento en la secuencia de costos y las estructuras de múltiples niveles que facilitan el deterioro de los productos en el procesamiento interno, clasifican de forma extensiva los modelos que se usan. En su mayoría se desprenden del modelo EOQ para la CS, incluso analizan la producción mediante el modelo EPQ.

Para demanda con comportamiento estocástico se han desarrollado modelos como [19]. Se propone que la política de inventario (1, T) se aplique a productos perecederos, así, el intervalo de tiempo entre dos órdenes consecutivos y el valor del tamaño del pedido son constantes. Se asume el problema de inventario como un sistema de líneas de espera M/M/1. Si el tiempo de permanencia de un cliente supera un valor constante predeterminado, este abandona el sistema.

Los estudios anteriores proponen asumir el deterioro y la demanda desde una perspectiva más real. Se separan de la mayoría de estudios de inventarios para productos perecederos que consideran el deterioro como un parámetro de vida útil fija, el cual no depende de las características del producto y la demanda como conocida. Sin embargo, tampoco tienen en cuenta la cooperación e integración de varios eslabones de la CS [20], factores clave que se puede generar en el contexto de modelos IRP.

4. Análisis de VRP en productos perecederos

El VRP es un problema de optimización combinatoria donde un conjunto de clientes, geográficamente dispersos, deben ser servidos por una flota de vehículos. Uno de los supuestos principales es que cada vehículo puede realizar solo una ruta en el horizonte de planeación [21], una ruta implica un recorrido que inicia en un nodo determinado, pasando por un subconjunto de nodos en una secuencia dada y, por lo general, el recorrido termina en el nodo inicial [22]. Los nodos pueden representar clientes que deben ser visitados en alguna ruta. El tamaño total de las entregas no debe exceder la capacidad de los vehículos y al mismo tiempo satisfacer la demanda [23]. Por lo general,



los objetivos al obtener las rutas apropiadas, son minimizar el costo total del viaje o la distancia recorrida.

Varios estudios han hecho revisión de la literatura de VRP. En [24] se analizan 28 variaciones del problema de ruteo de vehículos que podrían ser adaptados al IRP, que incluso se considera una extensión del VRP [25]. La revisión realizada en [26], muestra un crecimiento en las últimas décadas del número de métodos de solución, ya que la posibilidad de implementar instancias más grandes hace que el CVRP o VRP capacitado, una flota de vehículos homogénea y con la misma capacidad, sea la variante más usada —88,89 %— en los artículos revisados. Lo anterior también sucede en la mayoría de los modelos IRP, ya que pocos autores han planteado el uso de flota heterogénea y transporte multimodal [27].

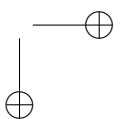
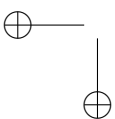
En cuanto al VRP aplicado a perecederos, resalta el VRP con nodos estocásticos (SVRP, por sus siglas en inglés, *Vehicle Routing Problem Stochastic Nodes*) para el caso de flores estudiado en [28]. En la literatura se proponen diferentes problemas que implican la distribución de productos alimenticios de carácter perecedero [29], [30], aunque la mayoría de los modelos no tiene en cuenta de forma explícita la degradación de calidad (pérdida de frescura) de los alimentos durante el transporte y podrían ser aplicados a productos no perecederos [31]. En la actualidad, modelos VRP han sido usados en el comercio electrónico y las compras en línea. Los alimentos son distribuidos mediante un modelo denominado el E-Problema de ruteo y entrega de comestibles (EDRP, por sus siglas en inglés, *E-grocery Delivery Routing Problem*) [32].

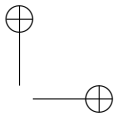
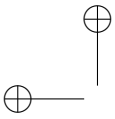
El VRP, al ser un problema enfocado al ruteo de vehículos, no considera la gestión de inventarios en el tiempo, los modelos revisados no tienen en cuenta las condiciones de perecibilidad de los productos, aunque ha tenido una evolución importante de los métodos de solución que permite disminuir la complejidad computacional e incluir más nodos. El desempeño global de la CS puede ser mejor aplicando modelos IRP.

5. *Inventory Routing Problem (IRP)*

Quizá el primer modelo que propende por la integración entre agentes de la CS es el inventario administrado por el vendedor (VMI, por sus siglas en inglés, *Vendor Managed Inventory*) [33]. El VMI considera la colaboración directa entre un proveedor y comprador, el vendedor asume la responsabilidad sobre la gestión del inventario de sus clientes, decide la cantidad, el tiempo de los envíos y garantiza que no se presente desabastecimiento por la disponibilidad de información precisa y oportuna para los agentes de la CS [34]. La política VMI es considerada como un acuerdo gana-gana [35], no obstante, su implementación implica decisiones de ruteo e inventarios para los clientes [31], [36], [37], por lo cual se hace necesario integrar estos dos aspectos (IRP) [29], [38].

El estudio del problema conjunto de ruteo e inventarios data de 1983 con el artículo seminal de [39]; en este trabajo los autores proponen un modelo de programación entera, aplicado a la distribución de gases industriales. Se obtienen rutas, asignación de vehículos, costos de transporte y volúmenes de entrega. La demanda se supone estocástica y se tiene en cuenta una política de cumplimiento para los niveles de inventario [39]. Algunas versiones IRP consideran multiproducto, con





minoristas que tienen demandas de producto variable en un horizonte de planeación dado [40].

En el problema estocástico de ruteo e inventarios (SIRP, por sus siglas en inglés, *Stochastic Inventory Routing Problem*). Un objetivo es que el proveedor determine una política de distribución que minimice su valor descontado esperado (ingresos menos costos) en el horizonte de planeación que puede ser finito o infinito [41]. La estocasticidad corresponde a la demanda y se puede producir escasez [42].

El IRP considera en simultáneo dos problemas: enrutamiento de vehículos y gestión de inventario. Uno o varios proveedores ofertan productos a un número de clientes geográficamente dispersos, dado un conjunto de restricciones. El propósito central es brindar soluciones de logística integrada, se pretende la coordinación de políticas para el reabastecimiento de inventarios y planes de distribución que minimicen los costos totales [43]. El proveedor toma decisiones de cuánto y cuándo entregar a cada cliente, y en qué rutas [44], así como el tipo y capacidad de vehículo a utilizar [45].

La demanda de los clientes puede ser estocástica con distribución normal y tiempos de viaje promedios [6]. En los modelos IRP también se ha utilizado optimización con demanda bajo incertidumbre, mediante programación entera mixta no lineal. Se determina un plan de distribución factible con parámetros de tiempo de ciclo de reposición y nivel de inventario de seguridad, aplicando simulación de Monte Carlo [3].

Se ha propuesto un método de programación estocástica de tres etapas para el sistema de suministro de gas natural licuado a lo largo del río Yangtzé en China, el modelo empleado es de programación lineal entera mixta, minimiza los costos de entrega, licuefacción, compra y construcción [46].

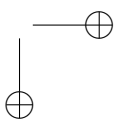
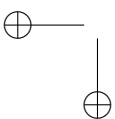
En la actualidad, los modelos SIRP tienen como reto contrarrestar las fluctuaciones de la demanda, así como el impacto ambiental que generan los procesos de distribución e inventario y no solamente minimizar costos; por ejemplo, se emplea transbordo como una forma de mejorar el desempeño económico y ambiental [47].

5.1. Taxonomía de modelos IRP

A través del tiempo se han propuesto modelos IRP específicos para diferentes situaciones, sin embargo, la complejidad del problema es un reto para su formulación. Para más detalles sobre los modelos generales de IRP, Coelho, Cordeau y Laporte realizan una clasificación a partir de una revisión de la literatura en el periodo 1982- 2012 [48]. En esta parte se realiza una revisión para los artículos IRP del 2013 al 2017, se propone una taxonomía que clasifica los artículos por tipos de modelos y métodos de solución, se clasifican las variables de decisión, los tipos de restricciones y parámetros.

5.1.1. Tipos de modelos y métodos de solución

Siguiendo la Tabla I, el modelo matemático empleado con mayor frecuencia es la programación entera mixta (44,4 %), le siguen la programación entera mixta no lineal (35,6 %) y la programa-



ción dinámica (11,1 %). La programación lineal y la programación entera (4,4 %) son las menos utilizadas. Las intersecciones hacen referencia al modelo y método aplicado simultáneamente y se muestran en la Figura 5.



Figura 5. Frecuencia según modelo matemático empleado en IRP.

El IRP se deriva del VRP clásico y se clasifica como un problema NP-Hard, debido a esta situación la mayoría de trabajos proponen heurísticas, metaheurísticas y mateheurísticas para su solución, aunque algunos autores han abordado el problema con algoritmos exactos. Para el análisis de los modelos se establecieron cuatro categorías: métodos exactos, heurísticas meta-heurísticas y simulación como se observa en la Figura 6.

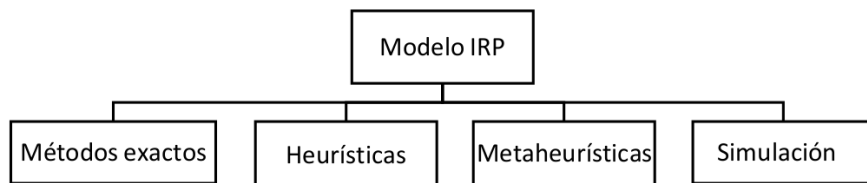


Figura 6. Esquema de los métodos de solución IRP más usados en la literatura.

Según la Tabla I, la mayor parte de trabajos IRP han aplicado heurísticas que exploran el espacio de solución mediante el uso de estructuras simples que descomponen el IRP en subproblemas jerárquicos. Los métodos de simulación representan la menor proporción. Los porcentajes por categoría se muestran en la Figura 7.

En [49] se plantea una heurística constructiva para resolver una versión multiproducto y multiperiodo para la distribución de combustible; por otro lado, en [50] proponen una heurística de dos fases: la primera considera un algoritmo de búsqueda adaptativa aleatorizada y la segunda fase mejora la solución con programación entera mixta y nuevas técnicas de búsqueda de vecindad variable.

Para el problema estocástico se propone un método de solución de ramificación y corte. La matriz de costo de transporte es simétrica y contempla arcos no dirigidos con el fin de reducir el número de variables [51]. Sin embargo, una solución económica óptima a veces puede dar lugar a inconvenientes tanto para el proveedor como para los clientes, es el caso de entregas muy pequeñas durante

días consecutivos, seguidas de una entrega muy grande. Después el cliente no es visitado durante un largo periodo [30], [46] y [47].

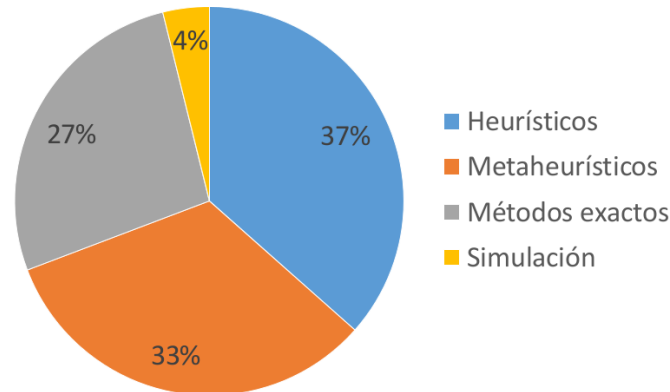


Figura 7. Gráfica porcentajes según método de solución IRP.

El IRP también ha sido estudiado aplicando programación dinámica. Se formula una decisión de Markov con un método propuesto de aproximación, se divide el problema general en subproblemas, eligiendo subconjuntos de clientes en una sola etapa [53], incluso los vehículos puedan realizar más de una ruta por periodo y se puede resolver mediante heurísticas, como la de generación de columnas [54]. Se han propuesto algoritmos de búsqueda local rápida para el caso de un solo vehículo; asimismo, se aplican políticas de inventario cíclico que restringen el conjunto de posibles soluciones al problema [55].

En [56] se propone una heurística con enfoque de dos fases. En la primera se combinan dos métodos para transformar el modelo en uno de programación lineal entera; en la segunda fase se aplica un método multiobjetivo difuso que resuelve el modelo de programación obteniendo la solución óptima. En [57] se desarrolla una metaheurística adaptativa de búsqueda por vecindad, asumen el IRP como un caso especial de un problema más amplio que incluye transbordos. El algoritmo lo desarrollan en dos fases, una definición de rutas de vehículos a través de la búsqueda por vecindad y la determinación de cantidades a entregar con un algoritmo exacto que minimiza el costo total de la red.

Entre los métodos híbridos, la simulación (52 %) y los algoritmos genéticos (11,5 %), así como la gran búsqueda local adaptativa (6 %) son los más usados; estos métodos tienen en cuenta el horizonte de planeación, la cantidad de eslabones, la variedad de producto y la cantidad de nodos en la red. Los criterios presentados que se han estudiado en algún momento incluyen versiones específicas del IRP. Con un solo cliente [53], con múltiples clientes [58], con entregas directas [59], multiproducto [60], con varios proveedores y clientes [61], con flota heterogénea [40], entre otros. Los modelos matemáticos se pueden clasificar en cuatro tipos como se muestra en la Tabla I, donde se resumen los modelos y métodos de solución que se obtuvieron de la evaluación bibliográfica del periodo 2013 a 2017. Dado que se dispone de una revisión hasta 2012 [48].

Tabla I. Modelos y métodos de solución para el IRP.

Referencia	Año	Tipos de Modelos Matemáticos											Tipos de Métodos de Solución											Función Objetivo		
		PL	PEM	PEM NL	PD	HTF	ABL	MH	AG	VNS	BT	S	VND	CA	CH	RL	BRM	CIH	B&B	ARC	ALNS	Objetivo	Única	Múltiple		
[62]	2013	x						x														Min	x			
[63]	2013		x					x														Min		x		
[64]	2013			x		x																Min	x			
[65]	2013		x				x															Min		x		
[66]	2014		x																x			Min		x		
[49]	2014		x									x										Min		x		
[67]	2014		x					x														Max		x		
[55]	2014			x					x													Min		x		
[68]	2014		x																x			Min		x		
[69]	2014				x					x					x							Min		x		
[70]	2014		x					x			x											Min		x		
[60]	2014			x						x												Min		x		
[71]	2014			x			x															Min		x		
[61]	2014			x											x							Min		x		
[72]	2014					x					x											Min		x		
[57]	2014																			x		Min		x		
[73]	2014		x					x			x											Min		x		
[74]	2014		x					x														Min		x		
[75]	2014		x								x											Min		x		
[76]	2014			x				x	x													Min		x		
[77]	2014													x								Min		x		
[42]	2015		x		x			x														Min		x		
[78]	2015	x						x														Min		x		
[79]	2015		x																x			Min		x		
[50]	2015		x															x				Min		x		
[51]	2015			x				x														Min		x		
[56]	2015			x				x														Min		x		
[80]	2015		x					x														Min		x		
[81]	2015			x																x		Min		x		
[59]	2015			x			x															Min		x		
[82]	2015			x				x														Min		x		
[83]	2015							x			x											Min		x		
[84]	2016		x					x														Min		x		
[85]	2016		x																x			Min		x		
[86]	2016		x						x													Max		x		
[87]	2016							x												x		Min		x		
[88]	2016		x					x														Max		x		
[89]	2016			x					x													Min		x		
[90]	2016				x						x											Min		x		
[91]	2016			x				x														Min		x		
[92]	2016			x				x														Min		x		
[93]	2016		x																	x		Min		x		
[94]	2016			x					x													Min		x		
[95]	2016	x						x														Min		x		
[96]	2016		x									x										Min		x		
[97]	2016			x				x														Min		x		
[98]	2016		x					x														Min		x		
[99]	2017			x				x														Min		x		
[100]	2017			x				x														Min		x		
[101]	2017			x				x														Min		x		
[102]	2017			x					x													Min		x		
[103]	2017			x					x													Max		x		
[104]	2017		x							x												Min		x		
[105]	2017		x						x													Min		x		
[106]	2017			x					x													Min		x		
[107]	2017			x																		Min		x		
Total		3	25	21	3	2	3	29	6	2	2	6	2	1	1	2	1	2	2	1	3		47	9		

Notación: PL: Programación lineal, PEM: Programación entera mixta, PEMNL: Programación entera mixta no lineal, PD: Programación dinámica, HTF :Heurística de tres fases basada en una descomposición, ABL: Algoritmo de búsqueda local, MH: Método Híbrido, AG: Algoritmos genéticos, VNS : Búsqueda local variable de dos fases , BT: Búsqueda tabú, S: Simulación, VND: Búsqueda local variable de descenso, CA: Colonia de abejas, CH: Colonia de hormigas RL: Relajación Lagrangiana , BRM: Búsqueda guiada de ramificación y precio , CIH: Construcción de múltiples inicio y heurística de mejora, B&B: Método de ramificación y acotamiento , ARC: Algoritmo de ramificación y corte, ALNS : Gran búsqueda local adaptativa.

Las principales variaciones del IRP que se han publicado en los últimos cuatro años son: IRP *with maritime transportation* (MIRP), *single-vehicle cyclic* IRP (SV-CIRP), *multi-product multi-vehicle* IRP (MMIRP), *vendormanaged IRP with lost sales* (VMIRPL), IRP *with time windows* (IRPTW), *stochastic* IRP (SIRP), *dynamic and stochastic* IRP (DSIRP), *stochastic programming* IRP (SMIRP), *healthcare* IRP (HIRP), *single-period stochastic* IRP (SSIRP), *infinite-horizon deterministic* IRP (IHIRP), *cyclic* IRP (CIRP), IRP *with transshipments* (IRPT), *inventory routing and pricing problem* (IRPP), *multi-product and multi-period Location-IRP* (LIRP), *perishable* IRP (PIRP).

5.1.2. Clasificación por variables de decisión

Se han definido tres conjuntos para agrupar las variables de decisión, estos son costo, tiempo y cantidad, los cuales son descritos en la Tabla II. La clasificación depende de las variables de asignación, por ejemplo, se usan variables binarias para determinar los nodos a visitar en las rutas y variables continuas para las cantidades a entregar. Se identifican diez tipos de costos en las funciones objetivo, el costo total es la principal variable de decisión y el costo de mantener el inventario es fundamental en la estructura de los modelos analizados.

En la Figura 8 se muestra la relación de las variables de decisión más empleadas por categoría; las áreas de intersección revelan que son pocos los modelos que plantean una función multiobjetivo.

El análisis de costos muestra los resultados en el siguiente orden: costo total (90 %), costo de mantener inventario (44 %), costo total por viaje (26 %) y costo total por envío (15 %). Lo anterior corresponde con el 82,69 % de los artículos analizados cuya función objetivo es minimizar costos. El tiempo total por viaje (13 %), el tiempo por ruta (11 %), el tiempo de viaje por vehículo (9 %) y el tiempo total de espera (9 %) son los más representativos. Prevalece como aspecto crítico de la gestión de inventario los modelos con horizonte de tiempo largo para la generación de rutas.; asimismo, la cantidad de inventario por cliente (27 %), la cantidad transportada a través del arco (25 %) y la cantidad de vehículos requeridos (21 %) son las variables más empleadas en esta categoría.

5.1.3. Clasificación por tipo de restricciones

Se clasifican las restricciones en dos categorías: ruteo e inventarios, como se observa en la Tabla III.

Las áreas de intersección hacen referencia al número de artículos que comparten tipos de restricciones; por ejemplo, tres artículos tienen restricción de programación de viajes y, al mismo tiempo, de eliminación de subtours. Las restricciones de ruteo según su frecuencia son: la ruta comienza y termina en el mismo nodo (80,7 %), eliminación de subtours (71,1 %), programación de viajes (28,8 %), asignación de vehículos (23,0 %) y realizar todas las rutas (21,1 %), los demás tipos tienen una baja utilización en estos modelos.

Para las restricciones de inventario se obtuvo que balance de flujo de producto (50 %), equilibrio de inventario (36,5 %), nivel de inventario entre periodos (28,8 %) y la cantidad de cargue y descargue (26,9 %) son las más representativas, como se muestra en la Figura 9.

Tabla II. Variables de decisión IRP.

Referencia	Año	Variables de Decisión																													
		Costos							Tiempo							Cantidades															
		CTE	CTV	CTA	CTT	CTI	CIV	CT	CA	CMP	CMI	TTV	TWV	TR	TEE	TTE	TCD	CPS	CPE	CEE	CPV	CAR	CA	CIC	IRA	IRV	NI	CVR	CEA	LR	RV
[62]	2013						x												x												
[63]	2013						x																		x						
[64]	2013	x					x				x																				
[65]	2013						x															x									
[66]	2014						x			x							x						x				x				
[49]	2014						x			x											x										
[67]	2014	x					x						x																		
[55]	2014						x										x						x								
[68]	2014	x					x	x				x															x		x		
[69]	2014						x													x		x							x		
[70]	2014	x					x				x						x								x		x			x	
[60]	2014						x	x										x				x								x	
[71]	2014	x					x				x																			x	
[61]	2014						x																x								
[72]	2014						x				x								x												
[57]	2014	x					x													x		x		x						x	
[73]	2014						x	x			x														x						
[74]	2014						x												x					x				x		x	
[75]	2014	x					x				x								x											x	
[76]	2014						x				x													x		x	x				
[77]	2014						x													x											
[42]	2015						x													x				x						x	
[78]	2015						x	x			x									x				x				x		x	
[79]	2015						x																								
[50]	2015	x					x																								
[51]	2015	x					x				x													x		x					
[56]	2015										x											x			x						
[80]	2015	x					x																							x	
[81]	2015						x	x			x										x										
[59]	2015						x																							x	
[82]	2015	x																													
[83]	2015						x				x																			x	
[84]	2016						x																							x	
[85]	2016	x					x				x	x																		x	
[86]	2016						x				x																				
[87]	2016	x									x																				
[88]	2016						x																								
[89]	2016						x				x																			x	
[90]	2016	x	x				x																							x	
[91]	2016						x				x	x																		x	
[92]	2016	x									x																			x	
[93]	2016						x																							x	
[94]	2016						x				x																			x	
[95]	2016	x					x																							x	
[96]	2016						x				x																			x	
[97]	2016						x				x																			x	
[98]	2016	x					x				x																			x	
[99]	2017						x				x																			x	
[100]	2017	x					x				x	x																		x	
[101]	2017						x	x			x																			x	
[102]	2017	x					x																							x	
[103]	2017	x					x				x																			x	
[104]	2017	x					x				x	x																		x	
[105]	2017	x					x				x																			x	
[106]	2017	x					x				x																			x	
[107]	2017	x					x				x																			x	
Total		9	15	8	7	6	4	47	3	5	27	7	6	6	5	3	4	13	7	5	6	14	9	14	9	8	9	11	8	10	8

Costos C: CTE: total por envío, CTV: total por viaje, CTA: total de almacenamiento, CTT: total del transporte, CTI: total inventario, CIV: incurridos por el vendedor, CT: total, CA: alistamiento, CMP: manipulación del producto, CMI mantener inventario. **Tiempo T:** TTV: total por viaje,

TVV: viaje por vehículo, TR: por ruta, TEE: envió entre vehículos, TTE: total de espera, TCD: total de cargue y descargue. **Cantidad** C: CPS: producto sobrante, CPE: del producto entregado, CEE: entrega por estación, CPV: producto por vehículo, CAR: transportada a través del arco, CAD: a descargar, CIC: inventario por cliente, CVR: vehículos requeridos, CEA: espacio de almacenamiento requerido. **Inventario** I: IRA: reposición por almacén, IRV: reposición por vendedor, NI: nivel de inventario. LR: longitud de la ruta, RV: ruta por vehículo

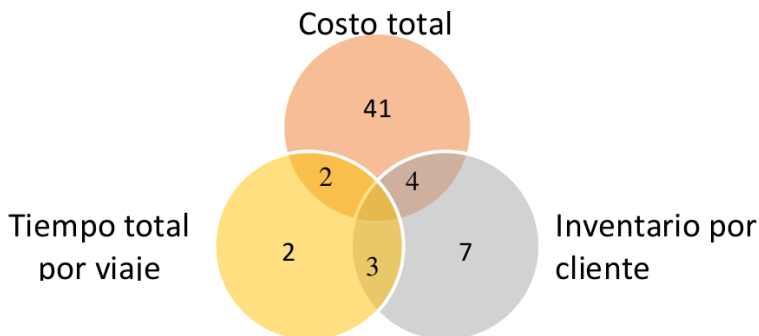


Figura 8. Frecuencia de las variables de decisión IRP.

5.1.4. Clasificación por parámetros

El análisis de los parámetros se agrupó en cuatro categorías: tiempo, inventario, demanda y costo. Los parámetros más frecuentes son el tiempo de entrega, el tiempo de recorrido por ruta, la demanda de producto, el inventario de los clientes y el costo de mantenimiento del inventario, como se muestra en la Tabla IV.

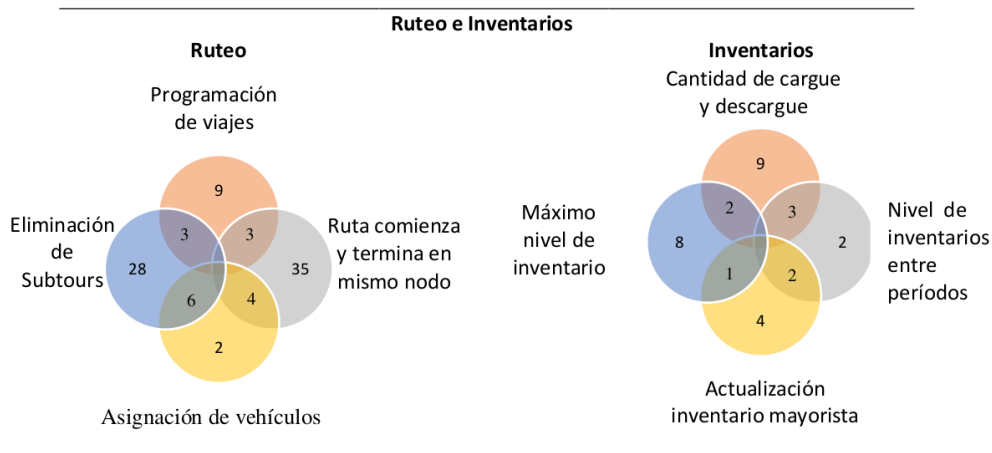


Figura 9. Frecuencia por tipo de restricciones IRP.

Tabla III. Tipos de restricciones IRP.

Referencia	Año	Restricciones																														
		Ruteo														Inventario																
		PR	PV	CD	VC	RR	CE	AV	CF	ES	LF	RN	EC	VT	UE	DD	NIT	BFP	CCD	AIA	AIM	NIC	MNI	BIM	EI	NIP	NIV	CDA	NIP	NIA	CI	DMI
[62]	2013	x									x																					
[63]	2013		x								x			x																		
[64]	2013			x							x														x							
[65]	2013					x					x																					
[66]	2014							x	x	x	x						x	x				x				x						
[49]	2014	x							x	x	x	x	x				x			x				x			x					
[67]	2014							x	x	x	x					x							x					x				
[55]	2014	x							x	x	x						x	x		x						x						
[68]	2014		x					x			x	x				x			x				x		x							
[69]	2014								x	x	x						x	x		x				x		x						
[70]	2014		x						x	x	x						x															
[60]	2014								x	x	x						x						x		x	x						
[71]	2014			x						x	x						x									x						
[61]	2014					x				x	x						x							x								
[72]	2014	x				x				x	x	x	x					x				x			x							
[57]	2014									x	x	x																				
[73]	2014	x				x				x	x	x					x			x					x							
[74]	2014							x			x	x	x													x						
[75]	2014									x	x	x						x			x							x				
[76]	2014		x							x	x	x																				
[77]	2014	x								x			x					x	x													
[42]	2015					x				x	x	x																				
[78]	2015	x						x		x	x	x						x	x													
[79]	2015									x	x	x																				
[50]	2015	x						x		x	x	x																				
[51]	2015					x				x	x	x																				
[56]	2015									x	x	x						x														
[80]	2015			x						x	x	x																				
[81]	2015									x		x	x																			
[59]	2015	x								x	x	x																				
[82]	2015					x					x	x	x																			
[83]	2015			x						x	x	x	x																			
[84]	2016									x	x	x	x																			
[85]	2016	x								x	x	x																				
[86]	2016	x								x	x	x																				
[87]	2016			x						x	x	x																				
[88]	2016	x								x	x	x																				
[89]	2016			x							x	x	x																			
[90]	2016									x	x	x																				
[91]	2016	x								x	x	x																				
[92]	2016									x																						
[93]	2016										x																					
[94]	2016										x																					
[95]	2016										x	x	x																			
[96]	2016											x																				
[97]	2016										x	x	x																			
[98]	2016	x									x																					
[99]	2017										x	x	x																			
[100]	2017										x																					
[101]	2017										x	x	x																			
[102]	2017											x																				
[103]	2017										x																					
[104]	2017										x	x	x																			
[105]	2017											x																				
[106]	2017										x	x	x																			
[107]	2017										x	x	x																			
Total		5	16	12	7	12	4	12	36	37	9	46	7	7	8	5	8	27	14	9	7	9	11	7	20	15	8	9	8	13	8	5

Ruteo: PR: programación de rutas, PV: programación de viajes, CD: cumplimiento de demanda, VC: visitar al cliente una sola vez, RR: realizar todas las rutas, CE: control de entregas, AV: asignación de vehículos, CF: conservación de flujo en la red, ES: eliminación de subtours, LF: limitaciones de la frecuencia de entrega, RN: ruta comienza y termina en el mismo nodo, EC: evitar congestión de vehículos, VT: ventanas de tiempo, UE: unificación de entregas, DD: demanda diaria por ruta. **Inventario:** NIT: nivel de inventario de la tienda, BFP: balance de flujo de producto, CCD: cantidad de cargue y descargue, AIA: actualización del inventario a bordo diario, AIM: actualización inventario mayorista, NIC: nivel de inventario de clientes, MNI: máximo nivel de inventario, BIM: balance de inventario minoristas, EI: equilibrio de inventario, NIP: nivel de inventario de cada

producto, NIV: nivel de inventario antes y después de la visita al depósito, CDA: capacidad de los depósitos de almacenamiento, NIP: nivel de inventario entre periodos, NIA: nivel de inventario del almacén, CI: capacidad de inventario, DMI: demanda máxima de inventario.

Tabla IV. Parámetros IRP.

Referencia	Año	Parámetros de tiempo										Parámetros de Inventario y demanda										Parámetros de costo									
		TV	TM	TE	TD	TIF	TR	TP	TLL	TED	H	VP	DM	DP	IS	GC	TDE	TPR	CP	CD	IC	TN	DMI	FV	VAT	UND	MAN	ESP	ESC		
[62]	2013	x																													
[63]	2013		x																												
[64]	2013		x																												
[65]	2013			x																											
[66]	2014			x																											
[49]	2014			x																											
[67]	2014			x																											
[55]	2014				x																										
[68]	2014					x																									
[69]	2014		x	x																											
[70]	2014																														
[60]	2014																														
[71]	2014			x	x																										
[61]	2014			x																											
[72]	2014			x																											
[57]	2014			x																											
[73]	2014			x			x	x	x																						
[74]	2014			x																											
[75]	2014			x																											
[76]	2014				x																										
[77]	2014			x																											
[42]	2015			x																											
[78]	2015			x																											
[79]	2015																														
[50]	2015			x																											
[51]	2015																														
[56]	2015		x	x																											
[80]	2015																														
[81]	2015			x																											
[59]	2015																														
[82]	2015			x	x																										
[83]	2015																														
[84]	2016		x	x	x																										
[85]	2016																														
[86]	2016			x																											
[87]	2016		x	x																											
[88]	2016			x																											
[89]	2016			x																											
[90]	2016		x	x																											
[91]	2016																														
[92]	2016		x	x																											
[93]	2016		x	x																											
[94]	2016																														
[95]	2016		x	x																											
[96]	2016			x																											
[97]	2016			x																											
[98]	2016																														
[99]	2017																														
[100]	2017			x																											
[101]	2017																														
[102]	2017			x																											
[103]	2017																														
[104]	2017			x																											
[105]	2017			x																											
[106]	2017			x																											
[107]	2017																														
Total		6	8	32	7	5	36	9	8	8	7	4	8	14	9	9	8	7	8	7	8	7	16	11	12	36	32	29	54	6	8

Tiempo T: TV: de viaje promedio TM: de mantenimiento TE: de entrega TD: de descargue TIF: al inicio y al final de cada turno parada TR: recorrido por rutas TP: preparación cargue y descargue TLL: esperado de llegada TED: entre despacho de vehículos H: horarios de cargue y descargue. **Inventario y Demanda** VP: volúmenes de producción DM: demanda mayorista DP: demanda de producto IS: inventario de seguridad GC: grupo de

Cientes TDE: tasa de demanda TPR: tasa de producción CP: cantidad de proveedores CD: conjunto de depósitos IC: inventario Clientes TN: tasa neta de producto DMI: demanda del minorista. **Costo:** fijo por vehículo, variable vehículo, por unidad de distancia, de mantenimiento del inventario, de espera, costo de escasez.

Los parámetros se han agrupado según el tiempo, inventario y demanda. Las áreas de intersección muestran los parámetros simultáneos que incluyen los modelos analizados como se ilustra en la Figura 10 y la Figura 11.

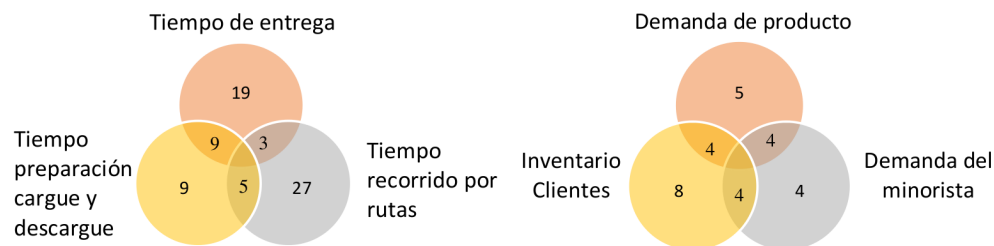


Figura 10. Frecuencia por tipo de restricciones de tiempo.

Figura 11. Frecuencia parámetros de demanda e inventario.

Los parámetros más representativos asociados al tiempo según su frecuencia son: recorrido por rutas (67,3%), entrega (59,6%), preparación cargue y descargue (17,3%). En cuanto al inventario y demanda: clientes (30,7%) demanda de producto (25%), la demanda minorista (23%). En los parámetros de costo resalta que el 100% de los artículos incluyen el costo de mantenimiento del inventario. El 65,38% tienen costos fijos vinculados a los vehículos y 57,6% costos variables.

Los artículos IRP clasificados y analizados presentan casos de aplicación para los modelos formulados, ya que los modelos clásicos solo permiten un análisis teórico del problema. Se emplean variaciones y combinaciones tanto del modelo propuesto como del método de solución, no obstante, aunque se conserva una estructura fundamental orientada a las condiciones de inventarios y ruteo, se observa que la construcción de los modelos y su solución son específicas para cada situación de la CS que involucra.

5.2. IRP de perecederos

En general, un producto perecedero es aquel que se descompone, daña, evapora, expira, invalida o devalúa a través del tiempo [108]. La literatura ha planteado que los perecederos forman parte de un conjunto de productos sujetos a deterioro, que clasifican en tres tipos: los primeros son productos en descomposición como el alcohol y la gasolina, caracterizados por tener una vida útil ilimitada y disminuyen en cantidad por vaporización; los segundos son productos que pierden valor parcial o total a través del tiempo por nueva tecnología o cambios como los chips de computadora, teléfonos móviles y moda; por su parte, los terceros son productos perecederos como frutas, vegetales, carnes, sangre humana, medicinas y flores, tienen una vida útil máxima en el tiempo [109]. Su estudio debe contemplar características biofísicas y organolépticas, el tiempo de producción, condiciones de transporte y almacenamiento, su vida útil [110]. Solo se consideran productos perecederos en esta sección.

A continuación, se presentan las investigaciones que han aplicado el IRP a los productos perecederos. Se hace una revisión de los propósitos fundamentales de dichos estudios, de sus metodologías y las técnicas empleadas. El primer artículo que se identificó de IRP para perecederos distribuye el producto desde un centro de acopio regional a un conjunto de minoristas con demandas aleatorias, considera el problema simultáneo de gestión del inventario para cada locación y la forma en que debe realizarse la asignación de la flota de vehículos para las entregas. Los productos tienen un tiempo de vida fijo durante el cual se pueden usar y luego deben ser desechados. Es el caso de la sangre humana y los medicamentos [111].

En [112] se propone una formulación con vida útil máxima de productos perecederos, utilizan un algoritmo de generación de columnas y una restricción para garantizar que el minorista no tenga un inventario mayor que la demanda total en horizontes de tiempo consecutivos. La demanda de los clientes es determinística, pero pueden variar de un periodo al siguiente. Las entregas llegan a los clientes al inicio del periodo. La red incluye el almacén, conjunto de clientes y una flota homogénea de vehículos.

En [74] se estudia un problema IRP integrado. El proveedor tiene capacidad de producción limitada y distribuye un único producto a un conjunto de minoristas que utilizan vehículos homogéneos. El deterioro de los productos es fijo. Proponen un modelo de programación entera mixta en tiempo discreto y desarrollan un algoritmo de dos fases, en la primera fase se utiliza búsqueda tabú para obtener la matriz de pedidos de los minoristas, mientras que en la segunda se genera la programación de la producción y se definen las rutas de distribución.

Algunos supuestos tradicionales en la literatura del IRP restringen el uso de los modelos propuestos en los sistemas de logística para perecederos [3]. En primera instancia, los costos de distribución entre los nodos son conocidos de antemano y son constantes. Sin embargo, el consumo de combustible y los costos asociados pueden cambiar en función de la carga del vehículo, la cual depende de la asignación de visitas a los clientes, entre otros aspectos. En segundo lugar, el supuesto de una vida ilimitada de los productos perecederos en los modelos IRP no permite que se considere la decadencia de su calidad, estos son obstáculos principales para la aplicación de los modelos básicos del IRP en perecederos [29]. Las anteriores consideraciones han traído nuevos objetivos logísticos, tales como la capacidad de controlar la calidad del producto, la capacidad de colaborar en la red de la CS para reducir el desperdicio de alimentos, la capacidad de reducir los impactos ambientales y sociales de las operaciones [3].

No son muchos los estudios que han abordado el IRP para perecederos y prescinden de los supuestos y restricciones iniciales de la técnica. Es relevante aclarar que en las últimas dos décadas la gestión de la CS de perecederos ha evolucionado, entre otras razones por la demanda de productos alimenticios seguros y de alta calidad, el aumento de la conciencia de la salud de los consumidores [113], el crecimiento de la población mundial, el cambio climático, recursos naturales limitados y la escalada de la conciencia de sostenibilidad [114], lo anterior muestra la necesidad de analizar el estado actual de la logística para perecederos.

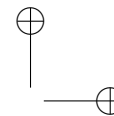
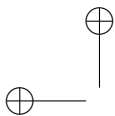
En cuanto a los artículos específicos de modelos IRP de perecederos, se presentan los artículos en la Tabla V. Se incluye la clasificación con respecto al tiempo, la estructura, ruteo, inventario y flota de vehículo.

Tabla V. Artículos IRP de Productos Perecederos.

Referencia	Año	Horizonte de tiempo		Estructura			Ruteo			Política de inventario		Decisiones de inventario			Flota de vehículos		Tamaño flota		
		Finito	Infinito	Uno a uno	Uno a muchos	Muchos a muchos	Directo	Múltiple	Continuo	Nivel máximo	Ordenar hasta el nivel	ventas pérdidas	Escasez	No negativo	Homogénea	Heterogénea	Única	Múltiple	Sin restricción
[7]	2014	x			x		x			x		x			x				x
[3]	2015	x			x			x		x		x			x			x	
[6]	2015	x			x		x			x			x		x			x	
[10]	2016	x			x			x		x			x					x	
[115]	2016		x		x			x			x					x	x		
[116]	2016	x			x			x		x		x			x			x	
[117]	2016	x		x					x	x		x			x			x	
[118]	2017	x			x			x		x			x		x			x	
[119]	2017	x			x					x		x			x				x
[120]	2017	x			x			x		x		x			x			x	
[121]	2017	x		x					x	x				x		x		x	
[122]	2017	x			x		x			x		x			x			x	
[123]	2017	x			x			x		x		x			x			x	
[124]	2017	x			x			x			x	x			x			x	
[125]	2017		x		x			x		x		x			x			x	
[126]	2017	x			x			x		x		x			x			x	

En [7] se consideran dos eslabones de la CS, varios proveedores envían a clientes minoristas los productos que tienen una vida útil y tiempo de almacenamiento fijo antes de que se consideren como pérdidas; incorpora parámetros de emisiones de dióxido de carbono estimando el consumo de combustible de las operaciones de transporte. En [3] se presenta un modelo multiperiodo IRP que tiene en cuenta la generación de CO₂ y el consumo de combustible de los vehículos, el modelo lo aplican a la distribución de tomate fresco en una cadena de supermercados. El objetivo del problema es determinar las rutas y la cantidad de los envíos en cada periodo de manera que el costo total sea el mínimo. En el ámbito de las restricciones, se considera el nivel de servicio para satisfacer una demanda incierta, se tiene en cuenta para el producto una restricción de tiempo de vida útil de tres y cuatro semanas. Las demás condiciones del modelo no incluyen otros aspectos críticos para perecederos.

En [6] se propone una CS de dos eslabones, un proveedor que sirve a un conjunto de minoristas geográficamente dispersos y con demanda determinística. Supone que la demanda del cliente final es una función decreciente lineal o exponencial de la vida útil de los productos perecederos. Cualquier unidad de producto que quede en inventario en el momento de la próxima entrega se considera en el modelo como una pérdida. En [10] se plantea un modelo con dos proveedores que producen higos y cerezas, emplean estimaciones detalladas de consumo de combustible en función de factores como el tipo de vehículo, la distancia recorrida, la carga del vehículo y la velocidad del vehículo. La consideración explícita de consumo de combustible asegura estimar el costo de transporte y las emisiones con mayor precisión para reducir el costo total de distribución. El objetivo del problema es determinar las rutas y la cantidad de los envíos en cada periodo, de tal manera que el costo total previsto sea el mínimo. Consideran la vida útil como un parámetro fijo de tres semanas y no contemplan otros factores que la afectan.



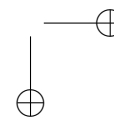
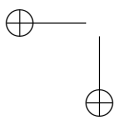
En [115] se presenta un modelo IRP multiproducto para perecederos con vida útil fija. La CS es de dos niveles, los productos se producen por un fabricante y se entregan a varios minoristas a través de una flota de vehículos heterogénea con capacidad fija. El objetivo es minimizar el costo total. Encuentran que un algoritmo de recocido simulado es superior que los algoritmos genéticos. Emplean el método de ramificación y corte y diferentes métodos de relajación. En [116] se formula un modelo integrado de programación lineal entera mixta. El nivel de calidad de los alimentos se verifica en toda la CS. El objetivo es maximizar la ganancia total, ingresos de venta menos la suma de los costos de producción, inventario y transporte. Las restricciones de perecibilidad implican vida útil fija.

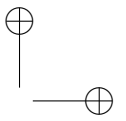
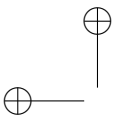
En [117] se propone un modelo biobjetivo con medidas de desempeño adicionales a las económicas para la distribución de productos perecederos con fecha de vencimiento fija. El primer objetivo se centra en la minimización de costos de inventario y distribución, el segundo objetivo considera aspectos sociales como la tasa de accidentes vehiculares y la cantidad de productos caducados, que a su vez tienen un impacto directo en el medioambiente y deben reciclarse; por ello, se aplica el concepto de logística de reversa para reunir los productos caducados de los minoristas y devolverlos al proveedor. En [118] se considera un modelo IRP aplicado a una empresa marroquí productora de agua potable embotellada que toma decisiones de inventario y ruteo para sus diferentes tipos de presentaciones. La distribución implica a un proveedor, un conjunto de depósitos regionales y mayoristas, para la solución se emplean algoritmos de ramificación y corte. La demanda se asume determinística en el horizonte de planeación.

En [119] se presenta un modelo IRP multiobjetivo de tres partes: la primera función es económica asociada a los costos, la segunda corresponde al nivel de satisfacción del cliente y la tercera a los aspectos ambientales. Los productos son alimentos perecederos con fecha de vencimiento fija. Se propone para trabajos futuros el uso de vehículos diésel y eléctricos en la distribución urbana. Emplean un algoritmo genético de clasificación no dominada-II (por sus siglas en inglés, *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II*, NSGA-II). En [120] se propone un modelo de localización, inventario y ruteo para productos alimenticios perecederos, el cual determina el número y la ubicación de los depósitos requeridos, el nivel de inventario para cada minorista y las rutas recorridas por cada vehículo. El modelo propuesto añade las decisiones de localización al IRP tradicional, aplicando el concepto de integración en el ámbito de las decisiones estratégicas, tácticas y operativas que producen mejores resultados para la CS. Utilizan un algoritmo genético y una heurística de búsqueda local, para resolver el problema.

En [121] se propone un modelo IRP con transbordo para un solo producto perecedero. El propósito es satisfacer la demanda del cliente bajo la política de nivel máximo durante el horizonte de planificación. Asumen una tasa de deterioro exponencial durante el tiempo que se almacenan el producto en el depósito del cliente. Para la solución, proponen un algoritmo genético y los parámetros se determinan utilizando el enfoque de diseño Taguchi.

En [122] se plantea un modelo de programación matemática IRP que maximiza los beneficios del sistema de producción multietapa, con restricciones de capacidad de producción. Toman en cuenta el inventario en cada etapa para calcular los costos. Incluyen restricciones de ventanas de tiempo con flota heterogénea y proponen dos algoritmos heurísticos para resolver el problema. En [123] se





propone un IRP de dos etapas para productos alimenticios, la primera etapa corresponde al problema de inventario con ventanas de tiempo y la segunda es el problema de transporte con restricciones de capacidad del vehículo. El problema se formula como un modelo de programación entera mixta, para la solución se propone una heurística híbrida, que usa el enfoque de agrupamiento para las distancias.

En [124] se desarrollan diferentes métodos de solución para resolver un IRP para productos perecederos con demandas estocásticas. Los métodos de solución se comparan empíricamente en términos de beneficio promedio, nivel de servicio y frescura real. Cuantifican los beneficios de considerar explícitamente la incertidumbre de la demanda.

En [125] se estudia, mediante un modelo de programación lineal entera mixta, una red de logística humanitaria de varios niveles que considera la ubicación de los almacenes centrales, para la gestión del inventario de productos perecederos en la fase previa a un desastre y el ruteo para los vehículos de socorro en la fase posterior al desastre. Para su solución emplean un algoritmo genético de ordenación no dominado y un algoritmo genético de clasificación no dominado. En [126] se plantea un modelo IRP de producción extendido para alimentos perecederos, donde la calidad está formulada explícitamente. Se adapta un enfoque iterativo de dos fases para resolver el modelo propuesto. Lo descomponen en dos subproblemas y lo resuelven secuencialmente. Los resultados muestran que con hasta 50 minoristas se obtienen soluciones de buena calidad dentro de un tiempo aceptable.

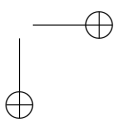
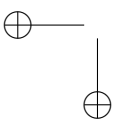
Como se puede observar, las industrias involucradas en la producción y distribución de productos perecederos, enfrentan grandes retos debido al corto ciclo de vida de los productos, así que los temas relacionados con la planificación de la CS, la gestión del inventario y el transporte, deben ser diferentes en comparación con industrias de productos no perecederos. La gestión de las fechas de vencimiento de los productos, la recolección de los productos caducados, la contaminación y el costo del reciclaje de los productos caducados son algunos aspectos que aumentan la complejidad de considerar productos perecederos en el IRP [122].

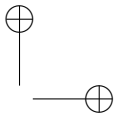
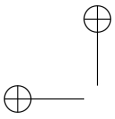
El alto costo de transporte y la baja calidad del servicio son debilidades comunes en las diferentes redes de logística, especialmente en la entrega de alimentos. Debido a sus características perecederas, la calidad de los alimentos se deteriorará durante el proceso de entrega, por ende, se evidencia una necesidad de coordinación en las actividades de ruteo e inventarios, con un enfoque de integración. Por ejemplo, uno de los problemas de coordinación es cómo integrar decisiones operativas importantes, incluida la programación de producción y el problema de enrutamiento de vehículos, que en sí, son los problemas más importantes para la satisfacción de los clientes [123].

6. Conclusiones

El IRP tiene su origen hace más de 33 años y aunque se deriva del VRP, se ha consolidado como un importante campo de investigación que ha generado varias formas de plantear el problema en términos de supuestos, restricciones y métodos de solución que parten de la programación lineal.

Para su clasificación se pueden tener en cuenta dos aspectos: el primero tiene que ver con la estructura del problema que está relacionada con la aplicación, el producto y la configuración de la





CS. El segundo es el modelo y método de solución que hace al IRP difícil de resolver en la mayoría de los casos dada su condición NP-Hard. Así, la mayoría de algoritmos construidos son de carácter heurístico. Incluso algunos métodos usan metaheurísticas y mateheurísticas más complejas combinadas con métodos exactos.

En cuanto a sus aplicaciones se verifica una amplia gama, sin embargo, sobresalen los artículos de transporte marítimo y distribución de gas. Las principales variaciones del IRP incluyen: el problema de ruteo e inventarios en la producción (PIRP), el IRP con un solo cliente y múltiples clientes, el IRP estocástico (SIRP), el IRP con entregas directas, el IRP multiproducto, IRP con flota heterogénea, IRP con transbordo (IRPT), IRP dinámico y estocástico (DSIRP), IRP con multivehículo (MIRP), el IRP con entregas directas y trasbordo, el IRP consistente, el IRP sostenible y el IRP para perecederos.

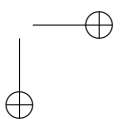
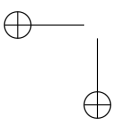
La aplicación en productos perecederos tiene pocos estudios, incluye alimentos procesados, medicamentos y sangre humana. La diferencia más importante con respecto a otros tipos de IRP es la restricción de vida útil, que en la mayoría de los casos se asume fija. Muy pocos autores han abordado funciones de deterioro en el tiempo para los productos perecederos, en esa medida, es necesario estudiar el impacto de esta consideración en los modelos propuestos. Tampoco se evidencia que los estudios definan claramente las diferencias que involucra en sus modelos la perecibilidad de los productos, lo que está relacionado con el bajo uso de modelos de inventarios específicos para perecederos.

Por último, se tiene que las extensiones del IRP se han empezado a plantear para situaciones específicas y particulares de la vida real, por lo tanto, la tendencia es aumentar el conjunto de extensiones y derivados, más que la formulación de problemas generales. Con respecto a las variables, restricciones y parámetros del IRP, se identifica que no es posible aplicarlas directamente dadas las condiciones y particularidades de las CS de perecederos, es necesario proponer su adaptabilidad con base en lo descrito en esta revisión.

7. Trabajo futuro

Los trabajos futuros en IRP para perecederos deberán tener en cuenta aspectos relacionados con las características de estos productos con base en sus respectivas CS, por ejemplo, aún no se tiene en cuenta las múltiples maneras que se lleva a cabo el deterioro con factores como la temperatura, la luz, el oxígeno, la humedad y en algunos casos los microorganismos; asimismo, los procesos asociados a la manipulación y el almacenamiento.

Los futuros modelos serán específicos para el problema a resolver. Los métodos de solución tenderán a hacer más eficiente los procesos heurísticos y metaheurísticos requeridos, dado que para instancias grandes y horizontes de tiempo largos el tiempo computacional es una barrera importante. El IRP para perecederos es un campo incipiente y con potencial para futuras investigaciones, tanto en los modelos y métodos de solución, deberán tener en cuenta condiciones como: la cadena de frío, normas de higiene, contaminación del aire, emisiones de gases de efecto invernadero, generación de residuos, ocupación de vías y demás aspectos relacionados con *city logistics* [127] y *green logistics* [128].



Referencias

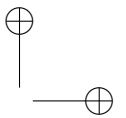
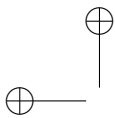
- [1] P. Amorim and B. Almada-Lobo, "The Impact of Food Perishability Issues in the Vehicle Routing Problem", *Comput. Ind. Eng.*, Vol. 67, No. 1, pp. 223–233, 2014. ↑ [118](#)
- [2] R. F. Roldán, R. Basagoiti, and L. C. Coelho, "A Survey on the Inventory-Routing Problem with Stochastic Lead Times and Demands", *J. Appl. Log.*, Vol. 24, Part A, pp. 15–24, 2017. ↑ [118](#)
- [3] M. Soysal, J. M. Bloemhof-Ruwaard, R. Haijema, and J. G. A. J. Van Der Vorst, "Modeling an Inventory Routing Problem for Perishable Products with Environmental Considerations and Demand Uncertainty", *Int. J. Prod. Econ.*, Vol. 164, pp. 118–133, 2015. ↑ [118](#), [119](#), [123](#), [133](#), [134](#)
- [4] H. Aguinis and A. Glavas, "What We Know and Don't Know About Corporate Social Responsibility: A Review and Research Agenda", *J. Manage.*, Vol. 38, No. 4, pp. 932–968, 2012. ↑ [119](#)
- [5] D. L. Rincón, J. E. Fonseca, and J. A. Orjuela, "Towards a Common Reference Framework for Traceability in the Food Supply Chain", *Ingeniería*, Vol. 22, No. 2, pp. 161–189, 2017. ↑ [119](#)
- [6] S. Mirzaei and A. Seifi, "Considering Lost Sale in Inventory Routing Problems for Perishable Goods", *Comput. Ind. Eng.*, Vol. 87, pp. 213–227, 2015. ↑ [119](#), [123](#), [134](#)
- [7] A. Al Shamsi, A. Al Raisi, and M. Afta, "Pollution Inventory Routing Problem with Perishable Goods", In *Logistics Operations, Supply Chain Management and Sustainability*, pp. 585–596, 2014. ↑ [119](#), [134](#)
- [8] P. C. Nolz, N. Absi, and D. Feillet, "A Stochastic Inventory Routing Problem for Infectious Medical Waste Collection", *Networks*, Vol. 63, No. 1, pp. 82–95, 2014. ↑ [119](#)
- [9] V. Hemmelmayr, K. F. Doerner, R. F. Hartl, and M. W. P. Savelsbergh, "Delivery Strategies for Blood Products Supplies", *Or Spectr.*, Vol. 31, No. 4, pp. 707–725, 2009. ↑ [119](#)
- [10] M. Soysal, J. M. Bloemhof-Ruwaard, R. Haijema, and J. G. A. J. Van Der Vorst, "Modeling a Green Inventory Routing Problem for Perishable Products with Horizontal Collaboration", *Comput. Oper. Res.*, pp. 1–15, 2016. ↑ [119](#), [134](#)
- [11] J. A. Orjuela-Castro, G. L. Diaz Gamez, and M. P. Bernal Celemin, "Model for Logistics Capacity in the Perishable Food Supply Chain", In *Applied Computer Sciences In Engineering*, pp. 225–237, 2017. ↑ [120](#)
- [12] S. Nahmias, *Perishable Inventory Systems*, Springer: Us, 2011. ↑ [120](#)
- [13] J. A. O. Castro and W. A. Jaimes, "Dynamic Impact of the Structure of the Supply Chain of Perishable Foods on Logistics Performance and Food Security", *J. Ind. Eng. Manag.*, Vol. 10, No. 4, pp. 687–710, 2017. ↑ [120](#)
- [14] R. Bai and G. Kendall, "A Model for Fresh Produce Shelf Space Allocation and Inventory Management with Freshness Condition Dependent Demand", *Inforns J. Comput.*, Vol. 20, No. 1, pp. 78–85, 2008. ↑ [120](#)
- [15] F. Andrés Pérez Mantilla and F. Torres, "Modelos de Inventarios con Productos Perecederos: Revisión de Literatura", *Ingeniería*, Vol. 19, No. 2, pp. 9–40, 2014. ↑ [120](#), [121](#)
- [16] B. Sivakumar, "A Perishable Inventory System with Retrial Demands and a Finite Population", *J. Comput. Appl. Math.*, Vol. 224, pp. 29–38, 2009. ↑ [120](#)
- [17] K. Van Donselaar, T. Van Woensel, R. Broekmeulen, and J. Fransoo, "Inventory Control of Perishables in Supermarkets", *Int. J. Prod. Econ.*, Vol. 104, No. 2, pp. 462–472, 2006. ↑ [120](#)
- [18] J. Pahl and S. Voß, "Integrating Deterioration and Lifetime Constraints in Production and Supply Chain Planning: a Survey", *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 238, pp. 654–674, 2014. ↑ [121](#)
- [19] A. Mahmoodi, A. Haji, and R. Haji, "One for One Period Policy for Perishable Inventory", *Comput. Ind. Eng.*, Vol. 79, pp. 10–17, 2015. ↑ [121](#)
- [20] J. A. Orjuela-Castro, A. L. Caicedo-Otavo, A. F. Ruiz-Moreno, and W. Adarme-Jaimes, "External Integration Mechanisms Effect on the Logistics Performance of Fruit Supply Chains. A Dynamic System Approach", *Rev. Colomb. Ciencias Hortícolas*, Vol. 10, pp. 311–322, 2016. ↑ [121](#)
- [21] D. Cattaruzza, N. Absi, D. Feillet, and T. Vidal, "A Memetic Algorithm for the Multi Trip Vehicle Routing Problem", *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 236, pp. 833–848, 2014. ↑ [121](#)
- [22] J. Jiang, K. M. Ng, K. L. Poh, and K. M. Teo, "Vehicle Routing Problem with a Heterogeneous Fleet and Time Windows", *Expert Syst. Appl.*, Vol. 41, pp. 3748–3760, 2014. ↑ [121](#)
- [23] V. F. Yu, P. Jewpanya, and A. A. N. P. Redi, "Open Vehicle Routing Problem with Cross-Docking", *Comput. Ind. Eng.*, Vol. 94, pp. 6–17, 2016. ↑ [121](#)
- [24] L. B. Rocha Medina, E. C. González La Rota, and J. A. Orjuela Castro, "Una Revisión al Estado del Arte del Problema de Ruteo de Vehículos: Evolución Histórica y Métodos de Solución", *Ingeniería*, Vol. 16, No. 2, pp. 35–55, 2011. ↑ [122](#)
- [25] L. C. Coelho, J. F. Cordeau, and G. Laporte, "Heuristics for Dynamic and Stochastic Inventory-Routing", *Comput.*

- Oper. Res.*, Vol. 52, No. Part A, pp. 55–67, 2014. ↑ [122](#)
- [26] K. Braekers, K. Ramaekers, and I. Nieuwenhuysse, “The Vehicle Routing Problem: State of the Art Classification and Review”, *Comput. Ind. Eng.*, Vol. 99, pp. 300–313, 2015. ↑ [122](#)
- [27] J. A. Orjuela-Castro, D. A. Sepulveda-García, and I. D. Ospina-Contreras, “Effects of Using Multimodal Transport Over the Logistics Performance of the Food Chain of Uchuva”, In *Applied Computer Sciences In Engineering*, pp. 165–177, 2016. ↑ [122](#)
- [28] E. C. Gonzalez-L., W. Adarme-Jaimes, and J. A. Orjuela-Castro, “Stochastic Mathematical Model for Vehicle Routing Problem in Collecting Perishable Products”, *Dyna*, Vol. 82, No. 189, pp. 199–206, 2015. ↑ [122](#)
- [29] R. Lahyani, M. Khemakhem, and F. Semet, “Rich Vehicle Routing Problems: from a Taxonomy to a Definition”, *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 241, No. 1, pp. 1–14, 2015. ↑ [122](#), [133](#)
- [30] Y. Zhang and X. D. Chen, “An Optimization Model for the Vehicle Routing Problem in Multi-Product Frozen Food Delivery”, *J. Appl. Res. Technol.*, Vol. 12, No. 2, pp. 239–250, 2014. ↑ [122](#), [125](#)
- [31] P. Amorim and B. Almada-Lobo, “The Impact of Food Perishability Issues in the Vehicle Routing Problem”, *Comput. Ind. Eng.*, Vol. 67, pp. 223–233, 2014. ↑ [122](#)
- [32] U. Emeç, B. Çatay, and B. Bozkaya, “An Adaptive Large Neighborhood Search for An E-Grocery Delivery Routing Problem”, *Comput. Oper. Res.*, Vol. 69, pp. 109–125, 2016. ↑ [122](#)
- [33] A. F. Ruiz, A. L. Caicedo, and J. A. Orjuela, “Integración Externa en las Cadenas de Suministro Agroindustriales: una Revisión al Estado del Arte”, *Ingeniería*, Vol. 20, No. 2, pp. 167–188, 2015. ↑ [122](#)
- [34] M. A. Darwish and O. M. Odah, “Vendor Managed Inventory Model for Single-Vendor Multi-Retailer Supply Chains”, *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 204, pp. 473–484, 2010. ↑ [122](#)
- [35] M. Hariga, M. Gumus, A. Daghfous, and S. K. Goyal, “A Vendor Managed Inventory Model Under Contractual Storage Agreement”, *Comput. Oper. Res.*, Vol. 40, pp. 2138–2144, 2013. ↑ [122](#)
- [36] S. Yanik, B. Bozkaya, and R. Dekervenoael, “A New Vrppd Model and a Hybrid Heuristic Solution Approach for E-Tailing”, *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 236, pp. 879–890, 2014. ↑ [122](#)
- [37] L. C. Coelho and G. Laporte, “Optimal Joint Replenishment, Delivery and Inventory Management Policies for Perishable Products”, *Comput. Oper. Res.*, Vol. 47, pp. 42–52, 2014. ↑ [122](#)
- [38] F. Baita and W. Ukovich, “Dynamic Routing-And-Inventory Problems: a Review”, *Transp. Res. Part a Policy Pract.*, Vol. 32, No. 8, pp. 585–598, 1998. ↑ [122](#)
- [39] W. J. Bell, L. M. Dalberto, M. L. Fisher, A. J. Greenfield, R. Jaikumar, P. Kedia, R. G. Mack, and P. J. Prutzman, “Improving the Distribution of Industrial Gases with An On-Line Computerized Routing and Scheduling”, *Interfaces (Providence)*, Vol. 13, No. 6, pp. 4–23, 1983. ↑ [122](#)
- [40] H. K. Chen, C. F. Hsueh, and M. S. Chang, “Production Scheduling and Vehicle Routing with Time Windows for Perishable Food Products”, *Comput. Oper. Res.*, Vol. 36, pp. 2311–2319, 2009. ↑ [123](#), [125](#)
- [41] C. Fu and Z. Fu, “Optimization on Stochastic Inventory-Routing Problem in Multi-Cycle Two-Echelon System”, *Comput. Eng. Appl.*, Vol. 46, pp. 198–201, 2010. ↑ [123](#)
- [42] L. Bertazzi, A. Bosco, and D. Laganà, “Managing Stochastic Demand in an Inventory Routing Problem with Transportation Procurement”, *Omega*, Vol. 56, pp. 112–121, 2015. ↑ [123](#)
- [43] A. Federgruen and P. Zipkin, “A Combined Vehicle Routing and Inventory Allocation Problem”, *Oper. Res.*, Vol. 32, No. 5, pp. 1019–1037, 1985. ↑ [123](#)
- [44] L. C. Coelho, J. F. Cordeau, and G. Laporte, “Consistency in Multi-Vehicle Inventory-Routing”, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, Vol. 24, pp. 270–287, 2012. ↑ [123](#)
- [45] R. Cuda, G. Guastaroba, and M. G. Speranza, “A Survey on Two-Echelon Routing Problems”, *Comput. Oper. Res.*, Vol. 55, pp. 185–199, 2015. ↑ [123](#)
- [46] H. Zhang, Y. Liang, Q. Liao, X. Yan, Y. Shen, and Y. Zhao, “A Three-Stage Stochastic Programming Method for Lng Supply System Infrastructure Development and Inventory Routing in Demanding Countries”, *Energy*, Vol. 133, pp. 424–442, 2017. ↑ [123](#), [125](#)
- [47] S. M. J. M. Al-E-Hashem, Y. Rekek, and E. M. Hoseinhajlou, “A Hybrid L-Shaped Method To Solve a Bi-Objective Stochastic Transshipment-Enabled Inventory Routing Problem”, *Int. J. Prod. Econ.*, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.06.020> ↑ [123](#), [125](#)
- [48] L. C. Coelho, J.-F. Cordeau, and G. Laporte, “Thirty Years of Inventory-Routing”, *Transp. Sci.*, Vol. 48, No. 1, pp. 1–19, 2012. ↑ [123](#), [125](#)
- [49] M. Vidović, D. Popović, and B. Ratković, “Mixed Integer and Heuristics Model for the Inventory Routing Problem in Fuel Delivery”, *Int. J. Prod. Econ.*, Vol. 147, pp. 593–604, 2014. ↑ [124](#)
- [50] Y. Shao, K. C. Furman, V. Goel, and S. Hoda, “A Hybrid Heuristic Strategy for Liquefied Natural Gas Inventory

- Routing”, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, Vol. 53, pp. 151–171, 2015. ↑124
- [51] A. Agra, M. Christiansen, A. Delgado, and L. M. Hvattum, “A Maritime Inventory Routing Problem with Stochastic Sailing and Port Times”, *Comput. Oper. Res.*, Vol. 61, pp. 18–30, 2015. ↑124
- [52] J. Cáceres-Cruz, A. A. Juan, S. E. Grasman, T. Bektas, and J. Faulin, “Combining Monte Carlo Simulation with Heuristics for Solving the Inventory Routing Problem with Stochastic Demands”, In *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (Wsc)*, pp. 1–9, 2012. ↑
- [53] A. J. Kleywegt, V. S. Nori, and M. W. P. Savelsbergh, “Dynamic Programming Approximations for a Stochastic Inventory Routing Problem”, *Source Transp. Sci.*, Vol. 38, No. 1, pp. 42–70, 2004. ↑125
- [54] B. Raa and E.-H. Aghezzaf, “A Practical Solution Approach for the Cyclic Inventory Routing Problem”, *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 192, No. 2, pp. 429–441, 2009. ↑125
- [55] A. Mjirda, B. Jarboui, R. Macedo, S. Hanafi, and N. Mladenović, “A Two Phase Variable Neighborhood Search for the Multi-Product Inventory Routing Problem”, *Comput. Oper. Res.*, Vol. 52, pp. 291–299, 2014. ↑125
- [56] F. Niakan and M. Rahimi, “A Multi-Objective Healthcare Inventory Routing Problem; a Fuzzy Possibilistic Approach”, *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, Vol. 80, pp. 74–94, 2015. ↑125
- [57] L. C. Coelho, J. F. Cordeau, and G. Laporte, “Heuristics for Dynamic and Stochastic Inventory-Routing”, *Comput. Oper. Res.*, Vol. 52, pp. 55–67, 2014. ↑125
- [58] G.-S. Liu, K.-P. Lin, H.-W. Lee, and C.-Y. Wang, “A Study of Inventory-Routing Problem for the Distribution System By Applying Genetic Algorithm”, In *Business Innovation and Technology Management (Abitm), 2011 Ieee International Summer Conference of Asia Pacific*, pp. 104–108, 2011. ↑125
- [59] T. Singh, J. E. Arbogast, and N. Neagu, “An Incremental Approach Using Local-Search Heuristic for Inventory Routing Problem in Industrial Gases”, *Comput. Chem. Eng.*, Vol. 80, pp. 199–210, 2015. ↑125
- [60] L. Qin, L. Miao, Q. Ruan, and Y. Zhang, “A Local Search Method for Periodic Inventory Routing Problem”, *Expert Syst. Appl.*, Vol. 41, pp. 765–778, 2014. ↑125
- [61] L. Wong and N. H. Moin, “Ant Colony Optimization for One-To-Many Network Inventory Routing Problem”, In *2014 Ieee International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2014, pp. 877–881, 2014. ↑125
- [62] L. C. Coelho and G. Laporte, “The Exact Solution of Several Classes of Inventory-Routing Problems”, *Comput. Oper. Res.*, Vol. 40, pp. 558–565, 2013. ↑
- [63] M. Hewitt, G. Nemhauser, M. Savelsbergh, and J. H. Song, “A Branch-And-Price Guided Search Approach To Maritime Inventory Routing”, *Comput. Oper. Res.*, Vol. 40, pp. 1410–1419, 2013. ↑
- [64] L. Bertazzi, A. Bosco, F. Guerriero, and D. Laganà, “A Stochastic Inventory Routing Problem with Stock-Out”, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, Vol. 27, pp. 89–107, 2013. ↑
- [65] L. Bertazzi and M. G. Speranza, “Inventory Routing Problems with Multiple Customers”, *Euro J. Transp. Logist.*, Vol. 2, No. 3, pp. 255–275, 2013. ↑
- [66] S. M. J. Mirzapour Al-E-Hashem and Y. Rezik, “Multi-Product Multi-Period Inventory Routing Problem with a Transshipment Option: a Green Approach”, *Int. J. Prod. Econ.*, Vol. 157, pp. 80–88, 2014. ↑
- [67] D. J. Papageorgiou, G. L. Nemhauser, J. Sokol, M. S. Cheon, and A. B. Keha, “Mirplib - a Library of Maritime Inventory Routing Problem Instances: Survey, Core Model, and Benchmark Results”, *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 235, pp. 350–366, 2014. ↑
- [68] L. C. Coelho and G. Laporte, “Improved Solutions for Inventory-Routing Problems Through Valid Inequalities and Input Ordering”, *Int. J. Prod. Econ.*, Vol. 155, pp. 391–397, 2014. ↑
- [69] K. Li, B. Chen, A. I. Sivakumar, and Y. Wu, “An Inventory-Routing Problem with the Objective of Travel Time Minimization”, *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 236, pp. 936–945, 2014. ↑
- [70] A. A. Juan, S. E. Grasman, J. Cáceres-Cruz, and T. Bektas, “A Simheuristic Algorithm for the Single-Period Stochastic Inventory-Routing Problem with Stock-Outs”, *Simul. Model. Pract. Theory*, Vol. 46, pp. 40–52, 2014. ↑
- [71] P. Vansteenwegen and M. Mateo, “An Iterated Local Search Algorithm for the Single-Vehicle Cyclic Inventory Routing Problem”, *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 237, pp. 802–813, 2014. ↑
- [72] B. Raa, “Cyclic Versus Reactive Planning for Inventory Routing”, *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, Vol. 111, pp. 909–917, 2014. ↑
- [73] Y. Zhang, M. Qi, L. Miao, and E. Liu, “Hybrid Metaheuristic Solutions To Inventory Location Routing Problem”, *Transp. Res. Part E*, Vol. 70, pp. 305–323, 2014. ↑
- [74] T. Jia, X. Li, N. Wang, and R. Li, “Integrated Inventory Routing Problem with Quality Time Windows and Loading Cost for Deteriorating Items Under Discrete Time”, *Math. Probl. Eng.*, Vol. 2014, pp. 1–14, 2014. ↑133
- [75] M. Mes, M. Schutten, and A. P. Rivera, “Inventory Routing for Dynamic Waste Collection”, *Waste Manag.*, Vol.

- 34, No. 9, pp. 1564–1576, 2014. ↑
- [76] N. Nekooghadirli, R. Tavakkoli-Moghaddam, V. R. Ghezavati, and S. Javanmard, “Solving a New Bi-Objective Location-Routing- Inventory Problem in a Distribution Network By Meta-Heuristics”, *Comput. Ind. Eng.*, Vol. 76, pp. 204–221, 2014. ↑
- [77] H. Z. A. Halim and N. H. Moin, “Solving Inventory Routing Problem with Backordering Using Artificial Bee Colony”, In *Ieee International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2014, pp. 913–917. ↑
- [78] B. Raa, “Fleet Optimization for Cyclic Inventory Routing Problems”, *Int. J. Prod. Econ.*, Vol. 160, pp. 172–181, 2015. ↑
- [79] J.-F. Cordeau, D. Laganà, R. Musmanno, and F. Vocaturo, “A Decomposition-Based Heuristic for the Multiple-Product Inventory- Routing Problem”, *Comput. Oper. Res.*, Vol. 55, pp. 153–166, 2015. ↑
- [80] Y. Jiang and I. E. Grossmann, “Alternative Mixed-Integer Linear Programming Models of a Maritime Inventory Routing Problem”, *Comput. Chem. Eng.*, Vol. 77, pp. 147–161, 2015. ↑
- [81] A. Hemmati, M. Stålhane, L. M. Hvattum, and H. Andersson, “An Effective Heuristic for Solving a Combined Cargo and Inventory Routing Problem in Tramp Shipping”, *Comput. Oper. Res.*, Vol. 64, pp. 274–282, 2015. ↑
- [82] S. Nurminarsih, A. Rusdiansyah, N. Siswanto, and A. Z. Gani, “Dynamic-Inventory Ship Routing Problem (D-Isrp) Model Considering Port Dwelling Time Information”, *Procedia Manuf. Serv. Sci. Procedia Manuf.*, Vol. 4, No. 4, pp. 344–351, 2015. ↑
- [83] J. Brinkmann, M. W. Ulmer, and D. C. Mattfeld, “Short-Term Strategies for Stochastic Inventory Routing in Bike Sharing Systems”, *Transp. Res. Procedia*, Vol. 10, pp. 364–373, 2015. ↑
- [84] M. Zenker, S. Emde, and N. Boysen, “Cyclic Inventory Routing in a Line-Shaped Network”, *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 250, pp. 164–178, 2016. ↑
- [85] W. Lefever, E.-H. Aghezzaf, and K. Hadj-Hamou, “A Convex Optimization Approach for Solving the Single-Vehicle Cyclic Inventory Routing Problem”, *Comput. Oper. Res.*, Vol. 72, pp. 97–106, 2016. ↑
- [86] Y. B. Park, J. S. Yoo, and H. S. Park, “A Genetic Algorithm for the Vendor-Managed Inventory Routing Problem with Lost Sales”, *Expert Syst. Appl.*, Vol. 53, pp. 149–159, 2016. ↑
- [87] A. Hemmati, L. M. Hvattum, M. Christiansen, and G. Laporte, “An Iterative Two-Phase Hybrid Matheuristic for a Multi-Product Short Sea Inventory-Routing Problem”, *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 252, pp. 775–788, 2016. ↑
- [88] F. Etebari and N. Dabiri, “A Hybrid Heuristic for the Inventory Routing Problem Under Dynamic Regional Pricing”, *Comput. Chem. Eng.*, Vol. 95, pp. 231–239, 2016. ↑
- [89] C. Cheng, M. Qi, X. Wang, and Y. Zhang, “Multi-Period Inventory Routing Problem Under Carbon Emission Regulations”, *Int. J. Prod. Econ.*, Vol. 182, pp. 263–275, 2016. ↑
- [90] J. Y. J. Chow, “Dynamic Uav-Based Traffic Monitoring Under Uncertainty As a Stochastic Arc-Inventory Routing Policy”, *Int. J. Transp. Sci. Technol.*, Vol. 5, No. 3, pp. 167–185, 2016. ↑
- [91] R. F. Roldán, R. Basagoiti, and L. C. Coelho, “Robustness of Inventory Replenishment and Customer Selection Policies for the Dynamic and Stochastic Inventory-Routing Problem”, *Comput. Oper. Res.*, Vol. 74, pp. 14–20, 2016. ↑
- [92] M. Chitsaz, A. Divsalar, and P. Vansteenwegen, “A Two-Phase Algorithm for the Cyclic Inventory Routing Problem”, *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 254, No. 2, pp. 410–426, 2016. ↑
- [93] M. Soysal, “Closed-Loop Inventory Routing Problem for Returnable Transport Items”, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, Vol. 48, pp. 31–45, 2016. ↑
- [94] M. Li, Z. Wang, and F. T. S. Chan, “A Robust Inventory Routing Policy Under Inventory Inaccuracy and Replenishment Lead-Time”, *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, Vol. 91, pp. 290–305, 2016. ↑
- [95] R. Nambirajan, A. Mendoza, S. Pazhani, T. T. Narendran, and K. Ganesh, “Care: Heuristics for Two-Stage Multi-Product Inventory Routing Problems with Replenishments”, *Comput. Ind. Eng.*, Vol. 97, pp. 41–57, 2016. ↑
- [96] E. Santos, L. S. Ochi, L. Simonetti, and P. H. González, “A Hybrid Heuristic Based on Iterated Local Search for Multivehicle Inventory Routing Problem”, *Electron. Notes Discret. Math.*, Vol. 52, pp. 197–204, 2016. ↑
- [97] M. Zhalechian, R. Tavakkoli-Moghaddam, B. Zahiri, and M. Mohammadi, “Sustainable Design of a Closed-Loop Location-Routing-Inventory Supply Chain Network Under Mixed Uncertainty”, *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, Vol. 89, pp. 182–214, 2016. ↑
- [98] A. Ghorbani and M. R. Akbari Jokar, “A Hybrid Imperialist Competitive-Simulated Annealing Algorithm for a Multisource Multi- Product Location-Routing-Inventory Problem”, *Comput. Ind. Eng.*, Vol. 101, pp. 116–127, 2016. ↑
- [99] I. T. Peres, H. M. Repolho, R. Martinelli, and N. J. Monteiro, “Optimization in Inventory-Routing Problem with

- Planned Transshipment: a Case Study in the Retail Industry”, *Int. J. Prod. Econ.*, Vol. 193, pp. 748–756, 2017. ↑
- [100] F. Rayat, M. Musavi, and A. Bozorgi-Amiri, “Bi-Objective Reliable Location-Inventory-Routing Problem with Partial Backordering Under Disruption Risks: a Modified Amosa Approach”, *Appl. Soft Comput.*, Vol. 59, pp. 622–643, 2017. ↑
- [101] N. Dabiri, M. J. Tarokh, and M. Alinaghian, “New Mathematical Model for the Bi-Objective Inventory Routing Problem with a Step Cost Function: a Multi-Objective Particle Swarm Optimization Solution Approach”, *Appl. Math. Model.*, Vol. 49, pp. 302–318, 2017. ↑
- [102] A. De, S. K. Kumar, A. Gunasekaran, and M. K. Tiwari, “Sustainable Maritime Inventory Routing Problem with Time Window Constraints”, *Eng. Appl. Artif. Intell.*, Vol. 61, pp. 77–95, 2017. ↑
- [103] M. Rahimi, A. Baboli, and Y. Rezik, “Multi-Objective Inventory Routing Problem: a Stochastic Model To Consider Profit, Service Level and Green Criteria”, *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* Vol. 101, pp. 59–83, 2017. ↑
- [104] S. Hasni, S. Toumi, B. Jarboui, and A. Mjirda, “Gvns Based Heuristic for Solving the Multi-Product Multi-Vehicle Inventory Routing Problem”, *Electron. Notes Discret. Math.*, Vol. 58, pp. 71–78, 2017. ↑
- [105] C. Cheng, P. Yang, M. Qi, and L.-M. Rousseau, “Modeling a Green Inventory Routing Problem with a Heterogeneous Fleet”, *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, Vol. 97, pp. 97–112, 2017. ↑
- [106] B. Raa and W. Dullaert, “Route and Fleet Design for Cyclic Inventory Routing”, *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 256, No. 2, pp. 404–411, 2017. ↑
- [107] G. Iassinovskaia, S. Limbourg, and F. Riane, “The Inventory-Routing Problem of Returnable Transport Items with Time Windows and Simultaneous Pickup and Delivery in Closed-Loop Supply Chains”, *Int. J. Prod. Econ.*, Vol. 183, Part, pp. 570–582, 2017. ↑
- [108] S. K. Goyal and B. C. Giri, “Recent Trends in Modeling of Deteriorating Inventory”, *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 134, No. 1, pp. 1–16, 2001. ↑ [132](#)
- [109] R. Li, H. Lan, and J. R. Mawhinney, “A Review on Deteriorating Inventory Study”, *J. Serv. Sci. Manag.*, Vol. 3, No. 1, pp. 117–129, 2010. ↑ [132](#)
- [110] J. A. Orjuela-Castro, F. S. Morales-Aguilar, and L. F. Mejía-Flórez, “Which is the Best Supply Chain for Perishable Fruits, Lean Or Agile?”, *Rev. Colomb. Ciencias Hortícolas*, Vol. 11, pp. 294–305, 2017. ↑ [132](#)
- [111] A. Federguen, G. Prastacos, and P. H. Zipkin, “An Allocation and Distribution Model for Perishable Products”, *Oper. Res.*, Vol. 34, No. 1, pp. 75–82, 1986. ↑ [133](#)
- [112] T. Le, A. Diabat, J. P. Richard, and Y. Yih, “A Column Generation-Based Heuristic Algorithm for An Inventory Routing Problem with Perishable Goods”, *Optim. Lett.*, Vol. 7, No. 7, pp. 1481–1502, 2013. ↑ [133](#)
- [113] J. A. Orjuela-Castro, L. A. Sanabria-Coronado, and A. M. Peralta-Lozano, “Coupling Facility Location Models in the Supply Chain of Perishable Fruits”, *Res. Transp. Bus. Manag.*, Vol. 24, pp. 73–80, 2017. ↑ [133](#)
- [114] B. Notarnicola, S. Sala, A. Anton, S. J. McLaren, E. Saouter, and U. Sonesson, “The Role of Life Cycle Assessment in Supporting Sustainable Agri-Food Systems: a Review of the Challenges”, *J. Clean. Prod.*, pp. 1–11, 201. ↑ [133](#)
- [115] H. Shaabani and I. N. Kamalabadi, “An Efficient Population-Based Simulated Annealing Algorithm for the Multi-Product Multi-Retailer Perishable Inventory Routing Problem”, *Comput. Ind. Eng.*, Vol. 99, pp. 189–201, 2016. ↑ [135](#)
- [116] Y. Li, F. Chu, Z. Yang, and R. W. Calvo, “A Production Inventory Routing Planning for Perishable Food with Quality Consideration”, *Ifac-Papersonline*, Vol. 49, No. 3, pp. 407–412, 2016. ↑ [135](#)
- [117] M. Rahimi, A. Baboli, and Y. Rezik, “Sustainable Inventory Routing Problem for Perishable Products By Considering Reverse Logistic”, *Ifac-Papersonline*, Vol. 49, No. 12, pp. 949–954, 2016. ↑ [135](#)
- [118] J. Lmariouh, L. C. Coelho, N. Elhachemi, G. Laporte, A. Jamali, and D. Bouami, “Solving a Vendor-Managed Inventory Routing Problem Arising in the Distribution of Bottled Water in Morocco”, *Eur. J. Ind. Eng.*, Vol. 11, No. 2, pp. 168–184, 2017. ↑ [135](#)
- [119] M. Rahimi, A. Baboli, and Y. Rezik, “Inventory Routing Problem for Perishable Products By Considering Customer Satisfaction and Green Criteria”, In *Dynamics in Logistics: Proceedings of the 5th International Conference Ldic*, 2016 Bremen, Germany, M. Freitag, H. Kotzab, and J. Pannek, Eds. Cham: Springer International Publishing, pp. 445–455, 2017. ↑ [135](#)
- [120] A. Hiassat, A. Diabat, and I. Rahwan, “A Genetic Algorithm Approach for Location-Inventory-Routing Problem with Perishable Products”, *J. Manuf. Syst.*, Vol. 42, pp. 93–103, 2017. ↑ [135](#)
- [121] A. Azadeh, S. Elahi, M. H. Farahani, and B. Nasirian, “A Genetic Algorithm-Taguchi Based Approach To Inventory Routing Problem of a Single Perishable Product with Transshipment”, *Comput. Ind. Eng.*, Vol. 104, pp.



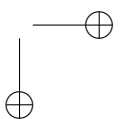
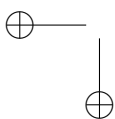
- 124–133, 2017. ↑135
- [122] B. Vahdani, S. T. A. Niaki, and S. Aslanzade, “Production-Inventory-Routing Coordination with Capacity and Time Window Constraints for Perishable Products: Heuristic and Meta-Heuristic Algorithms”, *J. Clean. Prod.*, Vol. 161, No. Supplement C, pp. 598– 618, 2017. ↑135, 136
- [123] C. Chao, T. Zhihui, and Y. Baozhen, “Optimization of Two-Stage Location- Routing-Inventory Problem with Time-Windows in Food Distribution Network”, *Ann. Oper. Res.*, pp. 1–24, May 2017. ↑135, 136
- [124] Y. Crama, M. Rezaei, M. Savelsbergh, and T. Van Woensel, “Stochastic Inventory Routing for Perishable Products”, *Transp. Sci.*, pp. 1–41, 2017. ↑136
- [125] M. Tavana, A.-R. Abtahi, D. Di Caprio, R. Hashemi, and R. Yousefi-Zenouz, “An Integrated Location-Inventory-Routing Humanitarian Supply Chain Network with Pre- and Post-Disaster Management Considerations”, *Socio-econ. Plann. Sci.*, P. , 2017. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2017.12.004> ↑136
- [126] Y. Li, F. Chu, and K. Chen, “Coordinated Production Inventory Routing Planning for Perishable Food”, *Ifac-Papersonline*, Vol. 50, No. 1, pp. 4246–4251, 2017. ↑136
- [127] E. Morganti and J. González-Feliu, “City Logistics for Perishable Products. The Case of the Parma’s Food Hub”, *Case Stud. Transp. Policy*, Vol. 3, No. 2, pp. 120–128, 2015. ↑137
- [128] M. Jedliński, “The Position of Green Logistics in Sustainable Development of a Smart Green City”, *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, Vol. 151, pp. 102–111, 2014. ↑137

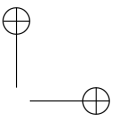
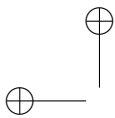
Diego Fernando Batero Manso

Ingeniero Industrial; especialista en Gestión de Proyectos de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; magíster en Ingeniería Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; instructor en el Servicio Nacional de Aprendizaje SENA; integrante del Grupo de investigación GICALyT.
Correo electrónico: dfbatero@misena.edu.co

Javier Arturo Orjuela Castro

Ingeniero de Alimentos; ingeniero industrial; especialista en Ingeniería de producción, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; magíster en Investigación de Operaciones y Estadística, Universidad Tecnológica de Pereira; candidato a doctor en Ingeniería Industrial y Organizaciones, Universidad Nacional de Colombia; docente e investigador en el área de Logística, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Director del Grupo de investigación GICALyT.
Correo electrónico: jorjuela@udistrital.edu.





Review paper

REVISTA
Ingeniería

A Survey of Materials for Solar Thermal Energy Storage

Una Revisión sobre Materiales para Almacenamiento de Energía Solar Térmica

Debrayan Bravo Hidalgo¹

¹Universidad San Francisco de Quito (USFQ), Quito, Ecuador
Correspondence: correspondence email: dbrayanbh@gmail.com

Recibido: 03/10/2017. Modificado: 23/01/2018. Aceptado: 30/01/2018.

Abstract

Context: The energy and environmental panorama that our societies confront nowadays, demand for renewable, clean and abundant sources of energy, not reliant on fossil fuels and detached from the geopolitical pressures the latter represent. In this scenario solar thermal energy arises as a viable and functional option. The main disadvantage of this emerging source of energy lies in the intermittent availability of solar radiation. Because of this difficulty, efficient processes for the storage of thermal solar energy becomes a highly relevant area of research. The aim of this paper is to present a survey on this topic.

Method: A bibliographic review was carried out using the Scopus catalog. The search criteria for this purpose was defined using the following terms: solar+thermal+energy+storage+materials. This search pattern was applied to the title, abstracts and keywords of the contributions. Using the bibliometric tools of the citation database, the most cited documents were selected and the survey was developed.

Results: A growing interest in the scientific community regarding this energy practice is evident starting from 2010. Characteristics, advances and trends in systems that use thermal energy storage materials are presented for sensible and latent heat, materials compound changeover phase, and finally thermo-chemical thermal storage materials.

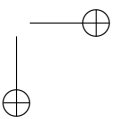
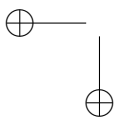
Conclusions: Improving the thermal conductivity of thermal storage materials is an important trend in current re-search. On the other hand, profitable practices for micro-encapsulated phase change materials and composite materials are analyzed. The optimization of thermo-physical properties as the melting point of thermal storage materials is explored with techniques such as eutectic mixtures and hydro-carbon chain length. Although the thermochemical materials are still in laboratory stage, they have a great potential as thermal storage materials in the future, given their large energy storage capacity per unit volume.

Keywords: Solar thermal energy, thermal energy storage, phase change materials, bibliographic survey

Language: Spanish



Cite this work as: D. Bravo, "A Survey of Materials for Solar Thermal Energy Storage". Ingeniería, vol. 23, no. 2, pp. 144-165, 2018.
©The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.12510>



Resumen

Contexto: El panorama energético y medioambiental que hoy día enfrenta la sociedad, demanda el empleo de fuentes renovables de energía, abundantes, limpias y apartadas de las tensiones geopolíticas asociadas a los combustibles fósiles. En este escenario, la energía solar térmica se presenta como una opción viable y funcional; sin embargo, su desventaja radica en el carácter intermitente de la radiación solar, de allí que los procesos de almacenamiento de energía solar térmica cobren especial relevancia para solucionarlo. El propósito de este artículo es presentar una revisión bibliográfica sobre este tema de interés.

Método: Se realizó una revisión bibliográfica en el catálogo Scopus, utilizando como criterio de búsqueda la frase “*solar thermal energy storage materials*”. Este patrón de búsqueda se aplicó al título, los resúmenes y las palabras claves de los artículos consultados. Con las herramientas de análisis bibliométrico de esta base de datos se seleccionaron los documentos más referenciados, con los cuales se procedió a realizar la revisión.

Resultados: Se destaca un creciente interés en la comunidad científica por esta práctica energética a partir de 2010. Se presentan las características, los avances y tendencias en los sistemas que emplean materiales de almacenamiento de energía térmica por calor sensible y por calor latente, materiales de cambio de fase compuestos y, por último, los materiales termoquímicos de almacenamiento térmico.

Conclusiones: La mejora de la conductividad térmica de los materiales de almacenamiento térmico es un área importante en las actuales investigaciones. Por otra parte, se analizan prácticas rentables para materiales de cambio de fase microencapsulado y materiales compuestos. La optimización de las propiedades termofísicas como el punto de fusión de los materiales de almacenamiento térmico, se exploran con técnicas como las mezclas eutécticas y la longitud de la cadena de hidrocarburos. Los materiales termoquímicos se encuentran en fase de laboratorio, estos tendrán un gran potencial como materiales de acumulación térmica en el futuro dado su gran capacidad de almacenamiento de energía por unidad de volumen.

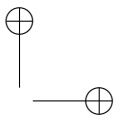
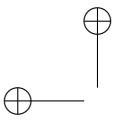
Palabras clave: Acumulación térmica, energía solar térmica, materiales de cambio de fase, revisión bibliográfica.

Idioma: Español

1. Introducción

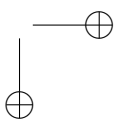
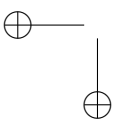
Aplicaciones como el calentamiento o refrigeración de espacios interiores de edificaciones requieren del almacenamiento de energía térmica (AET) a bajas temperaturas, es decir, por debajo de 50 °C, mientras que aplicaciones como la generación de energía eléctrica requieren sistemas AET de altas temperaturas mayores a los 175 °C [1], [2]. Las prestaciones de los sistemas AET dependen de las propiedades de los materiales seleccionados para este propósito [3]–[5]. Las propiedades termofísicas de los materiales de almacenamiento de energía térmica deben considerarse de acuerdo con los requerimientos propios de cada campo de aplicación [6]–[8]. Por ello, se deben tener presentes las características mencionadas a continuación.

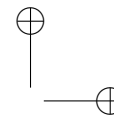
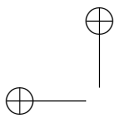
- Calor latente de fusión: los materiales de cambio de fase deben tener un calor latente de fusión muy alto. El calor latente elevado de la fusión mejora la densidad de almacenamiento del sistema.
- Calor específico (C_p): los materiales sensibles de almacenamiento de calor deben tener un calor específico alto. El alto calor específico mejora la densidad de almacenamiento de energía del sistema.



- Punto de fusión: los materiales de cambio de fase deben tener un punto de fusión cercano al rango de temperatura de funcionamiento requerido del sistema AET.
- Densidad: la alta densidad mejora la densidad de almacenamiento y reduce el volumen del sistema AET.
- Conductividad térmica: la alta conductividad térmica aumenta la carga térmica y la tasa de descarga que se desea.
- Costo y disponibilidad: el precio más barato del material de almacenamiento reduce los costos de capital y operacionales.
- Súper enfriamiento: para materiales de cambio de fase, durante el proceso de congelación el superenfriamiento debe ser mínimo.
- Estabilidad térmica: no deben descomponerse a altas temperaturas. Esto da un rango de temperatura de operación más amplio. Las propiedades del material deben ser estables incluso después de prolongados ciclos térmicos de calentamiento y enfriamiento.
- Estabilidad química: alta estabilidad química de los materiales de almacenamiento aumenta la vida del sistema de acumulación térmica.
- Cambio de volumen: para los materiales de cambio de fase, el cambio de volumen durante el proceso de cambio de fase debe ser mínimo. Estos materiales deben poseer un bajo coeficiente de expansión térmica. Grandes cambios en el volumen aumentan el tamaño requerido del contenedor.
- Inflamabilidad: deben ser no inflamables y no explosivos.
- Presión de vapor: deben tener baja presión de vapor en el rango de temperatura operativa. En caso contrario se complejiza y encarece la instalación.
- No tóxico: no debe ser perjudicial para la salud de los operadores y el medio ambiente.
- No corrosivo: los materiales de almacenamiento de energía térmica corrosiva reducen drásticamente la vida útil de la instalación de almacenamiento de energía, debido a la corrosión de los contenedores.

Las instalaciones de acumulación térmica permiten disponer de energía en ausencia de luz solar, este hecho atenúa la dificultad que representa la intermitencia del astro rey en el mundo; la tecnología de acumulación térmica también ayuda a suavizar las fluctuaciones en la demanda de energía durante diferentes períodos del día. Actualmente, una de las corrientes investigativas en esta temática son los proyectos enfocados a la optimización de las características química y física de los materiales de almacenamiento térmico, toda vez que el éxito de cualquier tecnología de acumulación termoenergética depende en gran medida de los materiales seleccionados con este propósito [3], [9]. Esta contribución presenta un análisis crítico, sistemático y exhaustivo, mediante una revisión bibliográfica de los materiales empleados en los distintos procesos de acumulación térmica que operan con plantas de captación de energía solar, detallando la calificación y propiedades físico-químicas de estos materiales. Dado el gran interés que la comunidad científica ha despertado





por esta práctica energética, se destacan en este trabajo los avances y tendencias del empleo de los materiales de almacenamiento de energía térmica.

2. Materiales y métodos

Scopus es una base de datos bibliográfica y documental que contiene artículos, libros, conferencias, sus resúmenes y citas, agrupados estos en revistas científicas de reconocimiento internacional en las más diversas áreas del saber. Este catálogo académico investigativo tiene en su haber alrededor de 18000 títulos de más de 5000 editores internacionales, incluyendo la cobertura de 16500 revistas revisadas por pares [10]. A través de esta plataforma científica online, se realizó una revisión bibliográfica la cual se implementó estableciendo como criterio de búsqueda la frase “*solar thermal energy storage materials*”; este patrón de búsqueda se orientó al título, los resúmenes y las palabras clave de las contribuciones. De esta forma, se detectaron 2820 documentos y 72328 patentes registradas. Con las herramientas de análisis bibliométrico que brinda esta plataforma se seleccionaron los documentos más referenciados entre las investigaciones concernientes a los estudios sobre materiales para el almacenamiento de energía solar térmica. Dichas herramientas permitieron, además, detectar el comportamiento de la productividad científica y de patentes en los últimos dieciséis años, así como el desempeño bibliométrico de las revistas que más socializan resultados investigativos vinculados con la acumulación térmica. Los gráficos contenidos en este documento se generaron con el *software* MATLAB 2017a.

2.1. Limitaciones de la investigación

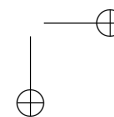
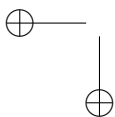
La revisión abarca solo resultados publicados en idioma inglés y contenidos en el directorio Scopus. Se consideran solo contribuciones del 2004 en adelante, exceptuando una única publicación de 1998, por contar con un índice Hirsch (H) de 550. El 67.6% de las referencias bibliográficas contenidas en este informe se concentran en los últimos tres años.

3. Resultados

3.1. Sinopsis bibliométrica de la temática “Materiales de almacenamiento de energía solar térmica” en el catálogo Scopus

Bajo los criterios de búsqueda declarados en la sección materiales y métodos, y empleando las herramientas de investigación y análisis de estadística bibliométrica que este catálogo ofrece a sus suscriptores, se generó empleando MATLAB la Figura 1, esta destaca el comportamiento tanto de las contribuciones científicas en esta área temática, como las patentes registradas en el mismo periodo de tiempo. Se puede observar que a partir del 2010 la comunidad científica internacional marca un notable incremento en las investigaciones dirigidas a las tecnologías de acumulación térmica y sus prácticas.

Las revistas que más socializan esta temática son, *Solar Energy*, *Energy Procedia*, *Applied Energy*, *Applied Thermal Engineering* y *Solar Energy Materials and Solar Cells*, según Scopus. La Figura 2



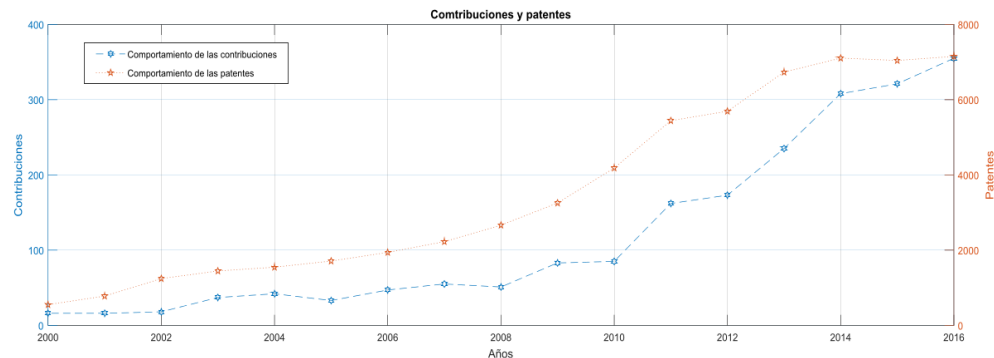


Figura 1. Comportamiento del número de contribuciones y patentes registradas dentro del directorio académico Scopus, bajo el criterio de búsqueda anteriormente mencionado. TITLE-ABS-KEY (solar AND thermal AND energy AND storage AND materials)

muestra el comportamiento del patrón de contribuciones por cada una de estas revistas del 2000 al 2016, también se muestra el patrón de citas bibliográficas por cada una de estas prestigiosas editoras científicas.

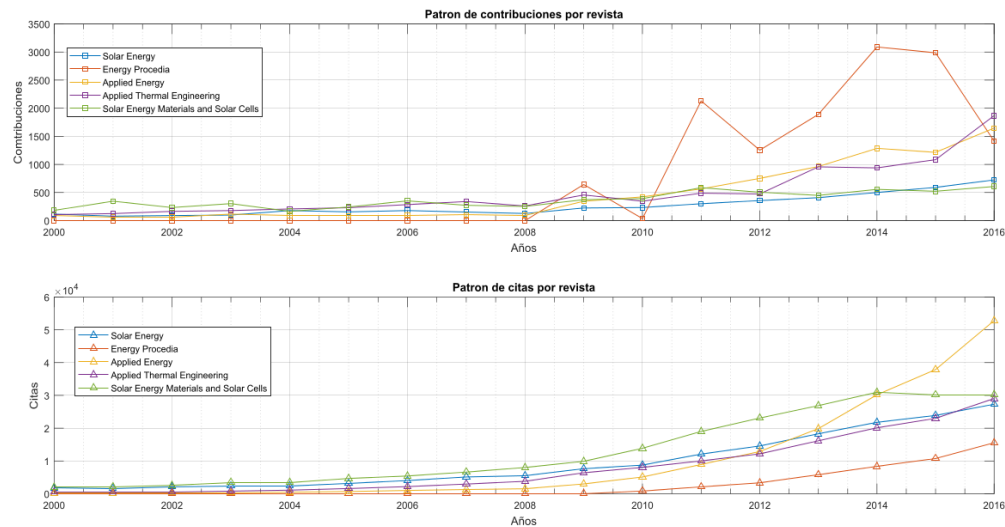
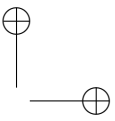
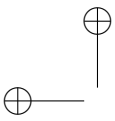


Figura 2. Análisis bibliométrico sobre la temática tratada, dentro de las revistas que más representatividad ofrecen a esta línea de trabajo dentro de Scopus. TITLE-ABS-KEY (solar AND thermal AND energy AND storage AND materials)

Tanto la Figura 1 como la Figura 2 evidencian el notable interés de investigadores e ingenieros en la alternativa de acumulación de energía solar térmica, evidencias que justifican y fundamentan la pertinencia de la presente contribución, ya que esta describe y analiza las distintas prácticas de acumulación térmica a partir de los materiales que se emplean con este propósito.



3.2. Materiales de almacenamiento de energía térmica por calor sensible

Los materiales de almacenamiento de energía térmica por calor sensibles acumulan energía por su capacidad calorífica específica (C_p). La energía térmica almacenada por calor sensible puede expresarse como:

$$Q = m * C_p * \Delta T \quad (1)$$

Donde

m : es la masa (kg).

C_p : es la capacidad calorífica específica ($kJ/kg * K$).

ΔT : es la diferencia de la temperatura durante el proceso de carga o descarga, es decir durante la absorción o cesión de energía térmica (K).

A continuación, se detallan algunos de los materiales de almacenamiento por calor sensibles más comunes en los sistemas de la acumulación de energía solar térmica.

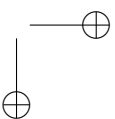
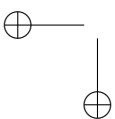
3.2.1. Medio de almacenamiento líquido

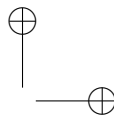
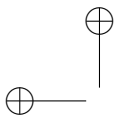
La ventaja de un medio de almacenamiento en estado líquido es que se puede hacer circular fácilmente y por lo tanto puede transportar calor con eficiencia. Los sistemas en los que el medio de almacenamiento es un fluido se denominan sistemas activos; además, debido a la diferencia de densidad causada por el gradiente térmico del fluido, se crea el termoclima que puede ser utilizado a favor del proceso [11], [12]. El líquido caliente sube y el líquido frío se desplaza hacia abajo separados por el termoclima. A continuación, se describen algunos de estos fluidos de transferencia de calor (FTC):

3.2.1.1. Agua

El agua es uno de los mejores medios de almacenamiento para aplicaciones a baja temperatura. Su rango de temperatura de funcionamiento está entre 8-90 °C [13], [14]. Sus ventajas son el elevado calor específico, la no toxicidad y la gran disponibilidad, pero tiene algunos inconvenientes como la alta presión de vapor y la corrosividad. El agua se utiliza para la calefacción y refrigeración de espacios interiores, y como servicio de agua caliente sanitaria. El agua salada en los estanques solares se utiliza para recoger gran cantidad de energía solar térmica a bajas temperaturas (50-95°C). El calor llega a la capa densa en la parte inferior del estanque debido a la sal disuelta que impide la convección natural. Se usan sales como NaCl y MgCl₂.

Los tanques de almacenamiento de agua están hechos de una amplia variedad de materiales como acero, aluminio, hormigón armado y fibra de vidrio, están aislados con lana de vidrio, lana mineral o poliuretano. Los tamaños de los tanques utilizados varían de unos pocos cientos de litros a miles de metros cúbicos, los grandes tanques de agua requieren el desarrollo de tecnologías capaces de garantizar la estanqueidad al agua, de minimizar las pérdidas de calor causadas por el vapor a través de las paredes y de optimizar la estratificación dentro del tanque, para preservar el rendimiento térmico y la vida útil de la planta solar. El agua también puede utilizarse para fines de almacenamiento de energía térmica a gran escala en acuíferos subterráneos donde el agua podría





encontrarse mezclada con grava, un sistema de este tipo es muy rentable ya que se puede evitar costos de construcción de tanques de agua [15], [16].

3.2.1.2. Aceite mineral

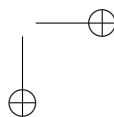
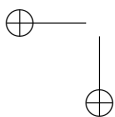
El aceite mineral se utiliza como FTC en plantas de captación de energía solar térmica (PCEST) para coleccionar el calor en el receptor y luego transporta el calor al generador de vapor para impulsar las turbinas, este es su propósito; puede usarse también para almacenar energía térmica en tanques de almacenamiento altamente aislados y disponer de energía durante las noches. Cuando el FTC también se convierte en material de almacenamiento de energía, se les denomina a las instalaciones de sistema directo, puesto que elimina la necesidad de intercambiador de calor, reduciendo el costo. El aceite mineral tiene una presión de vapor más baja que el agua y es capaz de funcionar a altas temperaturas en forma líquida hasta 400 °C; por otro lado, a diferencia de las sales fundidas, el aceite mineral no se congela durante la noche en las tuberías, lo cual excluye la necesidad de un sistema anticongelante [17]. Sin embargo, el aceite mineral es costoso en comparación con las sales fundidas y recientemente se han descubierto mezclas de sales fundidas con bajo punto de fusión, reemplazando el aceite mineral como material de almacenamiento de energía. La tendencia reciente en PCEST es utilizar sistemas indirectos donde el aceite mineral actúa como FTC y las mezclas salinas fundidas actúan como material de acumulación térmica.

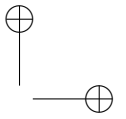
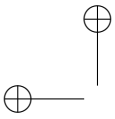
3.2.1.3. Sales fundidas

Las sales fundidas son actualmente los materiales de almacenamiento de energía térmica más utilizados en las PCEST. Son baratas, especialmente los nitratos y su densidad es alta en comparación con otros medios fluidos de almacenamiento, lo que les da alta densidad de almacenamiento de energía. Las sales fundidas tienen una presión de vapor inferior a la del agua y son capaces de funcionar a altas temperaturas —en forma líquida hasta 400 °C—, lo anterior permite el funcionamiento de la planta a altas temperaturas, por lo que mejora la eficiencia del ciclo termodinámico Rankine. Es necesario tener un punto de fusión inferior para las sales fundidas y cerca de la temperatura ambiente para que permanezcan líquidos durante el funcionamiento, también que el anticongelante sea mínimo durante la noche cuando no se dispone de energía solar. Pero las sales fundidas puras suelen tener puntos de fusión por encima de 200 °C, lo cual es una desventaja; sin embargo, hoy en día la práctica es utilizar compuestos de sal (más mezclas de sal) que hacen bajar el punto de fusión por debajo de 100 °C y aun así tener una temperatura máxima superior a 500 °C [9], [18]. También pueden actuar como FTC, pero es más seguro tener un sistema anticongelante para hacer frente a cualquier riesgo de congelación; de lo contrario, se utilizará aceite mineral como FTC. Uno de los inconvenientes de las sales fundidas es que son agentes oxidantes y muy corrosivos, por lo que contenerlos a altas temperaturas es complicado. También su conductividad térmica es baja y tiene un cambio de volumen alrededor del 6 % durante el proceso de fusión.

3.2.1.4 Metales y aleaciones líquidas

Los metales y aleaciones puras que tienen puntos de fusión bajos pero por encima de 300 °C también tienen potencial como medios de almacenamiento por calor sensibles, tienen una alta conductividad térmica y alta temperatura máxima de funcionamiento. Su presión de vapor es mínima, pero cuentan con la desventaja de un alto costo [19].





3.2.2. Medio de almacenamiento sólido

Los materiales sólidos de almacenamiento térmico tienen un bajo costo y alta disponibilidad. No tienen problema de presión de vapor. Toda vez que la presión de funcionamiento es la presión ambiente y, por lo tanto, no hay necesidad de contenedores presurizados, lo cual descarta los problemas de fugas. Debido a que no pueden circular fácilmente, solo puede hacerse almacenamiento pasivo de calor y se necesita un fluido, generalmente aire o agua como FTC para transportar calor dentro y fuera de materiales sólidos en un tanque de almacenamiento. Para aumentar la eficiencia de transferencia de calor hay un contacto directo entre el flujo de aire o agua y el medio de almacenamiento de calor en estado sólido, durante el proceso de carga y descarga [20]. Uno de los problemas con el almacenamiento sensible es que durante el proceso de descarga la temperatura del medio de almacenamiento disminuye, por lo que la temperatura del FTC también disminuye con el tiempo. Las aplicaciones a baja temperatura como el calentamiento de espacios y la recuperación de calor de residuos industriales pueden utilizar algunos de los materiales sólidos de almacenamiento de calor sensibles desarrollados a continuación.

3.2.2.1. Rocas

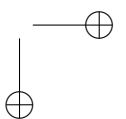
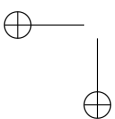
Pueden ser utilizados en un lecho compactado después de triturarlas a tamaños aproximados de 5 cm y emplear un FTC como el aire, agua o aceite mineral. El FTC caliente fluye entre las aberturas de las rocas compactadas y calienta la roca durante el proceso de carga, por otro lado, el FTC frío fluye entre las aberturas de las rocas y se calienta durante el proceso de descarga. Existe una gran superficie de contacto disponible para la transferencia de calor entre estos fluidos y las rocas, esto mejora la eficiencia de transferencia energética. Las rocas son conductores térmicos pobres y hay una pequeña área de contacto entre piezas de roca que minimiza la pérdida de calor durante el almacenamiento. Las rocas tienen ventajas como ser no tóxico, no inflamable, muy barato y fácilmente disponible. Los inconvenientes están en que estos sistemas demandan grandes caudales de FTC [21].

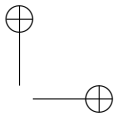
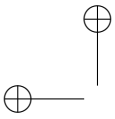
3.2.2.2. Hormigón

El concreto es un medio fácil de trabajar, pues posee una buena resistencia mecánica, no requiere de un recipiente de contención. Un enfoque de diseño para el intercambiador de calor entre el hormigón y el FTC es tener tuberías a través del bloque de hormigón, por medio de estas fluye el FTC. Uno de los problemas a considerar es que, a alta temperatura, se producen grietas después de ciclos repetidos de expansión y contracción térmica [22], [23].

3.2.2.3. Arena

Los materiales de grano pequeño disponibles comúnmente como grava o arena de sílice se pueden utilizar para el almacenamiento de energía térmica. Los granos de arena de sílice con un tamaño promedio de 0,2-0,5 mm pueden utilizarse en sistemas de almacenamiento de calor de lecho comprimido que utilizan aire como FTC, la densidad de embalaje es alta para los materiales de grano pequeño. La grava del basalto promedia los 0,4 mm, esta puede ser utilizada directamente en el receptor solar para recoger la energía solar térmica cuando caen bajo la acción de la gravedad desde





la parte superior de la torre del receptor solar. Después de absorber el calor de los rayos solares concentrados, durante su caída dentro de la torre, esta grava caliente se recoge en un pozo de almacenamiento aislado térmicamente. La temperatura de la grava caliente puede ir desde 700 a 1000 °C, la cual es empleada para producir el vapor que acciona los turbos generadores eléctricos en el ciclo termodinámico Rankine. La contribución de [24] fue estudiar la posibilidad de utilizar arena en lecho comprimido como medio de almacenamiento de calor para el sistema de almacenamiento de energía térmica a alta temperatura, los resultados de esta investigación muestran que las arenas tienen potencial de almacenamiento para temperaturas de hasta 550 °C.

3.2.2.4. Ladrillos

Los ladrillos en las paredes de edificios pueden almacenar energía térmica para minimizar los costos energéticos por concepto de calefacción de espacio [25], se pueden calentar en las horas punta durante la noche con electricidad más barata y almacenar el calor. El calor almacenado se extrae de los ladrillos durante el día por convección natural y radiación o por convección forzada utilizando un ventilador accionado eléctricamente [26], este calor almacenado mantiene el edificio caliente en las horas pico durante el día sin consumo de electricidad.

3.3. Materiales de almacenamiento de energía térmica por calor latente

Los materiales de almacenamiento por calor latentes también llamados materiales de cambio de fase (MCF) absorben la energía calorífica como su calor latente de fusión durante el proceso. En el transcurso del proceso de absorción de energía térmica se produce un cambio de fase y la oscilación de temperatura es muy pequeña. La energía térmica almacenada en el material puede expresarse como:

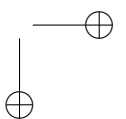
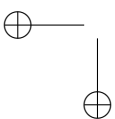
$$Q = m * L \quad (2)$$

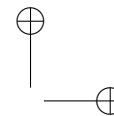
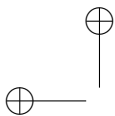
Donde

m : es la masa (kg).

L : es el calor latente de fusión (kJ/kg).

Por lo general, es el proceso de cambio de fase sólido a líquido el que se maneja. Las transformaciones de líquido a gas cuentan con un calor latente de cambio de fase más elevado; sin embargo, los monumentales cambios en el volumen de los materiales de almacenamiento asociados con la evaporación hacen que sea complejo el proceso de acumulación de energía y, por demás, poco práctico [27]. Si se utilizan materiales de almacenamiento de calor latente sólido a sólido, la falta de material líquido elimina el riesgo de fugas y no hay necesidad de encapsulación, pero su calor latente de transición es aproximadamente un orden de magnitud menor que el del material de almacenamiento de calor latente sólido a líquido, lo cual representa una considerable desventaja [28]. Los materiales de almacenamiento por calor latente deben contar con una alta conductividad térmica [29]–[31], deben tener un punto de temperatura de fusión próximo al rango de temperatura de funcionamiento requerido del sistema de AET, deben fundirse congruentemente con un subenfriamiento mínimo [32], ser químicamente estables, de bajo coste, no tóxicas y no corrosivas.





Durante el proceso de descarga, la temperatura del medio de almacenamiento es constante, por lo que la temperatura del FTC también permanece estable con el tiempo, lo anterior es una ventaja sobre los materiales de almacenamiento por calor sensibles. Para materiales de almacenamiento de calor latente hay una menor diferencia de temperatura entre el almacenamiento y la liberación de calor [33]. El calor latente de fusión del material es muy grande en comparación con el calor específico, por ejemplo, la sal de nitrato de sodio tiene un calor específico de 1,1 kJ/kg*K, pero su calor latente de fusión es de 172 kJ/kg aproximadamente, esta gran diferencia les da a los materiales de almacenamiento por calor latente una ventaja, alta densidad de almacenamiento de energía. Se reduce entonces el volumen de los sistemas de AET, lo cual se traduce en que se reducen su superficie exterior y se minimizan la pérdida de calor.

3.3.1. Materiales orgánicos

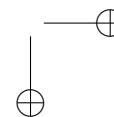
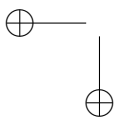
Los materiales orgánicos de almacenamiento o acumulación térmica por calor latente y sus mezclas eutécticas han sido probados e implementados con éxito en muchas aplicaciones domésticas y comerciales, tales como refrigeración y aire acondicionado, calefacción de edificaciones, dispositivos electrónicos, calefacción solar de aire o agua, textiles, automóviles, alimentos y la industria aeroespacial. Los materiales orgánicos poseen la capacidad de fusión congruente sin separación de fases [19]. Los MCF orgánicos tienen características inherentes de baja conductividad térmica (0,1-0,35 W/m*K), por lo que se requiere un área de superficie mayor para aumentar la tasa de transferencia de calor [18], [19]; además, debido al bajo punto de fusión de estos, todavía no se ha explorado su utilización para aplicaciones de alta temperatura como en centrales eléctricas.

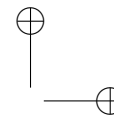
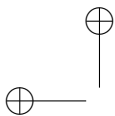
3.3.1.1. Parafinas

Las parafinas consisten en una cadena de n-alcenos lineales o normales ($\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_n - \text{CH}_3$) [34]. Las ceras parafínicas comerciales son baratas con una densidad de almacenamiento térmico moderada (200 kJ/kg) y un rango de temperaturas de fusión de -10°C hasta 67°C [31], [35]. Son químicamente inertes y estables sin segregación de fase. Son no corrosivos, inodoros, duraderos, baratos, fácilmente disponibles, ecológicamente inofensivos y no tóxicos; sin embargo, tienen baja conductividad térmica (0,2 W/m*K), esta característica limita sus aplicaciones [36]. La cera parafínica de calidad comercial se obtiene de la destilación del petróleo crudo. La mayoría de los MCF parafínicos son mezclas de hidrocarburos saturados con diferentes números de átomos de carbono en sus estructuras moleculares. La temperatura de fusión y el calor de fusión de los parafinos aumentan con la longitud media de la cadena de hidrocarburos, esta relación se puede emplear para diseñar las propiedades de los MCF mezclando parafinas físicamente diferentes. Incluso después de 1000 a 2000 ciclos, las ceras parafínicas de calidad comercial y otras parafinas puras tienen propiedades estables y una buena fiabilidad térmica; por otro lado, dado que no promueven la corrosión, son compatibles con recipientes metálicos, sin embargo, interactúan con algunos recipientes de plástico que tienen similitud química con estas. Polímeros como la poliolefina experimentan problemas como filtraciones y ablandamiento [37].

3.3.1.2. Ácidos grasos

Tienen una fórmula general de $(\text{CH}_2(\text{CH}_3)_{2n} - \text{COOH})$ y tienen propiedades termofísicas ideales como material de almacenamiento de calor latente a baja temperatura. Los puntos de fusión y





de ebullición de los ácidos grasos son relativamente altos comparados con las ceras parafínicas y los ácidos grasos saturados presentan cambios de volumen de transición de fase bajos. Tienen un comportamiento de fusión y congelación reproducible con muy poco o ningún superenfriamiento. Son más caros que los parafínicos, ligeramente corrosivos, tienen un olor desagradable y son combustibles [38]. En general, los puntos de fusión y congelación, el calor de fusión y el grado de cristalización de los ácidos grasos aumentan con el número de átomos de carbono en sus moléculas [35].

3.3.1.3. *Easters* o ácidos grasos esenciales

Se derivan de ácidos en los que un grupo hidroxilo (-OH) se sustituye por un grupo alquilo (-O). Los ácidos grasos *Easters* muestran una transición sólido-líquido en un rango de temperatura estrecho. Pueden formar los eutécticos sin o poco subenfriamiento. Las mezclas eutécticas de *Easters* tienen una temperatura de transición de fase cercana a la temperatura ambiente con alta entalpía de transición [39], [40]. Los ácidos grasos *Easters* tienen una buena disponibilidad, debido a sus aplicaciones comerciales en las industrias de polímeros, cosméticos y ropa inteligente.

3.3.1.4. Alcoholes

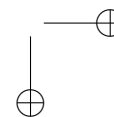
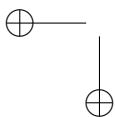
Los alcoholes de azúcar, también conocido como polialcoholes, se consideran como MCF de temperatura media entre 90 y 200 °C. No han recibido mucha atención por parte de los investigadores. Estudios anteriores revelaron que los alcoholes como xilitol, eritritol y manitol poseen un calor latente de fusión cercano a 300 kJ/kg, el cual es mucho más alto que otros materiales de esta familia. Los alcoholes se han probado como posibles materiales de cambio de fase en las últimas décadas [41].

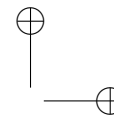
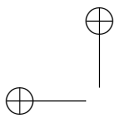
3.3.1.5. Glicoles

El polietilenglicol (PEG) tiene nombres diferentes como polioxietileno o óxido de polietileno. El PEG se compone de cadenas de éter dimetilico que tienen el grupo hidroxilo al final, con una fórmula de HO-CH₂ - (CH₂ -O-CH₂ -) n-CH₂ -OH. Son solubles tanto en agua como en compuestos orgánicos. El PEG viene en varios grados como PEG400, PEG600 etc., son química y térmicamente estables, no inflamables, no tóxicos, no corrosivos y económicos. El punto de fusión y el calor latente de fusión del PEG aumenta con el aumento del peso molecular [42]. Al igual que otros MCF orgánicos, el PEG también posee un valor de conductividad térmica pequeño, presentado esta cualidad una desventaja.

3.3.2. Materiales inorgánicos

Estos materiales cuentan con una alta capacidad volumétrica de calor latente de alrededor de 350 MJ/m³. Tienen propiedades estables incluso después de un gran número de ciclos térmicos y tienen una conductividad térmica relativamente alta de alrededor de 0,5 W/m*K; sin embargo, se funden incongruentemente [43], [44], son propensos a la segregación de fase y subenfriamiento. Otro problema importante con ellos es la corrosión que provocan las sales en los contenedores de metal.





3.3.2.1. Hidratos de sal

Los hidratos de sal se utilizan normalmente a bajas temperaturas de funcionamiento en el intervalo de 30 a 50 °C. Tienen una fórmula general $AB \cdot nH_2O$, son sales inorgánicas que contienen agua de cristalización. Durante la transformación de estado, se produce la deshidratación de la sal [45]. Esto puede ocurrir de dos maneras. Podría haber un hidrato de sal que contiene menos moléculas de agua o podría haber formas anhidras de la sal. Dependiendo del comportamiento de fusión, los hidratos de sal pueden clasificarse como se muestra a continuación.

- Hidratos de sales congruentes: la sal es soluble en el agua de hidratación durante la fusión.
- Hidratos de sal incongruentes: la sal es parcialmente soluble en el agua de hidratación durante la fusión.
- Hidratos de sal semicongruentes: después del cambio de fase, las fases sólida y líquida tienen diferentes composiciones debido a la transformación del hidrato de sal, en un hidrato de salino con una menor cantidad de agua.

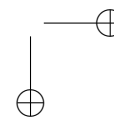
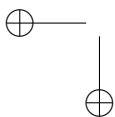
Sin embargo, un gran número de hidratos de sal que tienen el potencial de convertirse en MCF con temperatura de fusión adecuada y un gran calor latente se funden de forma incongruente. El agua liberada durante la transición de fase no disuelve la sal cristalina formada durante el proceso de deshidratación, lo anterior debido a la diferencia de densidad entre la sal, la separación de fases de agua y la sedimentación que se produce en los contenedores; este es un serio problema técnico en aplicaciones prácticas. Uno de los métodos utilizados para prevenir la segregación y la sedimentación es la adición de agentes gelificantes o espesantes [35]. La adición de material gelificante polimérico o celulósico a la sal impide la sedimentación de la sal, como agente espesante aumenta la viscosidad del hidrato de sal y ayuda a mantener las moléculas de hidrato de sal juntas. Otra desventaja de los hidratos de sal es un significativo superenfriamiento. Esto se debe a su pobre capacidad de nucleación y, por tanto, para evitar este problema, se añaden agentes nucleantes. Los agentes nucleantes como el bórax, el carbono [31], [46], etc., ayudan a superar el superenfriamiento, pero reducen la velocidad de transferencia de calor al disminuir la conductividad térmica.

3.3.2.2. Sales

Las sales inorgánicas operan similar a las sales fundidas explicadas con anterioridad, donde se usan sales de temperaturas de fusión relativamente más bajas como medio de almacenamiento de líquido sensible, pero también pueden actuar como materiales latentes de almacenamiento de calor para aplicaciones a altas temperaturas por encima de los 100 °C. Caen en muchos subgrupos de materiales como nitratos, carbonatos, hidróxidos, cloruros, etc., y tienen una amplia gama de temperaturas de fusión [47].

3.3.2.3. Metales y aleaciones metálicas

Los metales y sus aleaciones cuentan con altos valores de conductividad térmica, buena estabilidad térmica y fiabilidad [2], [48]. Poseen un calor de transición de fase elevado por unidad de volumen o unidad de masa, por lo tanto, tienen una capacidad de almacenamiento de energía muy



alta. Tienen un cambio considerable en el volumen durante el cambio de fase y una presión de vapor despreciable.; sin embargo, cuando el volumen es una prioridad, son capaces de competir con las sales [27], [36].

3.3.3. Eutéctico

El eutéctico es una composición de dos o más componentes tales como orgánico-orgánico, orgánico-inorgánico e inorgánico-inorgánico, cada uno de ellos cambia su fase de forma congruente, es decir, tiene un punto de fusión o congelación definido y forma una mezcla de cristal componente durante la cristalización. Los eutécticos generalmente se funden y congelan congruentemente y no dejan posibilidades de separación de los componentes [1].

3.4. Materiales de cambio de fase compuestos

Para solucionar el problema de la mala conductividad térmica, frecuentemente se dispersan partículas de alta conductividad como lo es el carbono, el grafito o los MCF, tales mezclas se denominan materiales compuestos de cambio de fase, estos se pueden preparar usando tanto materiales de cambio de fase orgánicos como inorgánicos. Los materiales térmicos conductores adicionales deben ser compatibles con el MCF.

3.4.1. Compuestos de grafito

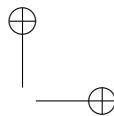
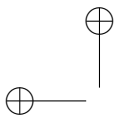
El grafito puede usarse en diferentes formas como se muestra a continuación. Los trabajos de [49], [50] expusieron el rendimiento de los MCF eutécticos $\text{NaNO}_3 / \text{KNO}_3$ con grafito. El grafito incrementa la conductividad térmica, pues es dispersado dentro de la sal fundida. Esta práctica mejoró la conductividad térmica catorce veces hasta una conductividad efectiva de $9 \text{ W/m}^2\text{K}$. Las contribuciones de [51], [52] mostraron el desempeño de los MCF compuestos por n-docosanol parafínicos con grafito expandido. Las conductividades térmicas de los MCF compuesto con fracción de masa de grafito expandido al 2 %, 4 %, 7 % y 10 % indicaron que la conductividad térmica de la parafina que es de $(0,22 \text{ W/m}^2\text{K})$ aumentó en 81,2 %, 136,3 %, 209,1 % y 272,7 %, respectivamente.

3.4.1.1. Grafito natural

Tienen una estructura cristalina bien alineada y una alta conductividad térmica. Han apilado láminas de carbono, donde los átomos de carbono se mantienen unidos por fuertes enlaces covalentes y estas hojas apiladas se mantienen unidas por enlaces débiles de Van der Waals, por lo tanto, cuentan con una elevada densidad. Requieren un tratamiento mínimo durante la producción y su costo es muy bajo [53].

3.4.1.2. Grafito natural expandido

Esto se produce a partir de grafito natural después de someterse a dos procesos, tratamiento químico y exfoliación térmica. En reacciones con diversos ácidos, se superan los enlaces débiles y se incorporan moléculas del reactivo entre las capas del grafito. La estructura de grafito tiene que expandirse para acomodar las moléculas reaccionantes, pero la estructura laminar permanece intacta,



esto se llama un compuesto intercalado. Después de que el compuesto intercalado con grafito se lava en agua y se seca, se calienta para provocar una rápida expansión de las capas de grafito. El tratamiento térmico se realiza en una atmósfera de aire a temperaturas superiores a 500 °C. El agua se incorpora entre las capas de carbono durante la formación del compuesto intercalado. La evaporación casi instantánea del agua durante el proceso de tratamiento térmico es responsable de la expansión. Cada partícula de grafito natural se modifica en forma de gusano en el que las capas de grafeno se diseminan conduciendo a una gran porosidad, estos gusanos pueden hacerse en un lecho y luego comprimirse para formar una matriz de grafito consolidada de alta porosidad y conductividad térmica [54].

3.4.1.3. Polvo de grafito expandido

Esto se prepara moliendo el grafito expandido en polvo. Tiene una estructura menos compacta que el grafito natural y tiende a construir redes incluso en pequeñas concentraciones. Así, en comparación con el grafito natural, se requieren cantidades menores de polvo de grafito expandido para alcanzar una conductividad térmica similar. Sin embargo, debido a los correspondientes tratamientos necesarios para su producción, es más caro que el grafito natural [36].

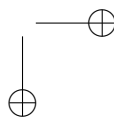
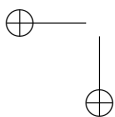
3.4.2. Nano compuesto

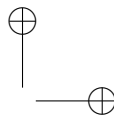
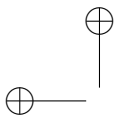
Se emplean diferentes nano-estructuras como aditivos de mejora térmica en MCF. La contribución de [55], [56] fue que investigaron varios tipos de nanopartículas y la implantación de estas en sistemas de acumulación térmica. Las nanopartículas tienen la ventaja de ser extremadamente pequeñas en tamaño, por lo tanto, se comportan como fluido en depósitos y conductos. Generalmente, las mejoras térmicas conseguidas con nanoestructuras están enfocadas en la conductividad térmica. Los trabajos de [57]–[59] contienen una revisión de los actuales estudios experimentales sobre las variaciones en las propiedades termofísicas de MCF debido a la dispersión de nanopartículas. Los tipos de nano-partículas son los siguientes:

- Nanofibras basadas en carbono, nano plaquetas, grafeno y nanotubos de carbono.
- Metálico (Ag, Al, C / Cu y Cu).
- Óxido metálico (Al_2O_3 , CuO, NiO, SiO_2 , ZnO, MgO y TiO_2).
- Nano-alambres de plata.

3.4.3. Compuesto de forma estable

Un compuesto de forma estable se considera un MCF, si puede mantener la misma forma en estado sólido incluso cuando la temperatura del material compuesto es superior a la temperatura de fusión del MCF. En un compuesto de forma estable, el MCF se puede moldear a formas requeridas con una proporción de área superficial a volumen más alta sin la ayuda de una encapsulación para aumentar la velocidad de transferencia de calor. Aquí la idea principal es mejorar la superficie de contacto del MCF, el aumento de la conductividad térmica no es la prioridad. En los estudios de [60], [61] se analizaron compuestos de polietileno parafínico de alta densidad, estables en forma, donde el parafínico actúa como material de acumulación térmica por calor latente, mientras que el





polietileno de alta densidad actúa como material de soporte que da resistencia estructural para evitar la fuga de partículas fundidas. Esta práctica generó mejoras del 24 % en la conductividad térmica.

3.4.4. Materiales de Cambio de Fase Microencapsulados (MCFME)

Las microcápsulas se pueden describir como partículas que contienen material de núcleo rodeado por un revestimiento o envoltura y tienen diámetros en el intervalo de 1-1000 μm . La microencapsulación es ampliamente utilizada en aplicaciones comerciales, incluyendo textiles, adhesivos, cosméticos, fármacos y edificaciones [34]. Los materiales de cambio de fase microencapsulados (MCFME) deben tener morfología requerida, diámetro uniforme, resistencia mecánica de la envoltura, capacidad de penetración y estabilidad térmica. Las bolsas, tubos, esfera, paneles u otros recipientes que contienen MCFME actúan directamente como intercambiadores de calor. El MCFME también se puede incorporar a materiales de construcción. La carcasa contiene el MCF líquido y evita cambios en su composición debido al contacto con el medio ambiente. Aumenta la superficie de contacto para la transferencia de calor, también añade la estabilidad mecánica a MCFME, si la envoltura es suficientemente rígida. Los MCFME están disponibles en varias formas y tamaños. La microencapsulación es un proceso relativamente costoso. La resina de urea-formaldehído, resina de melamina-formaldehído y poliuretanos son los materiales de concha de encapsulación más frecuentes en los sistemas de acumulación de energía térmica [62].

3.4.4.1. Coacervación

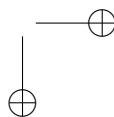
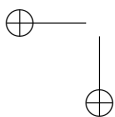
Cuando dos o más coloides de carga opuesta se dispersan en una solución acuosa de un MCF, la coacervación se produce debido a la fuerza electrostática entre partículas coloidales cargadas de forma opuesta para formar dos nuevas fases, una rica y una pobre en concentración coloidal. Estas partículas coloidales concentradas forman gotitas esféricas unidas entre sí por fuerzas electrostáticas [63], [64].

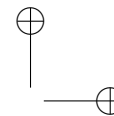
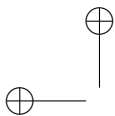
3.4.4.2. Polimerización en suspensión

Las microcápsulas con una cubierta de polímero y un núcleo de MCF pueden obtenerse mediante un proceso basado en la polimerización en suspensión. En este procedimiento, se dispersa un monómero o una mezcla de monómeros que contienen un iniciador en una solución acuosa de MCF empleado agitación mecánica. El iniciador puede descomponerse a radicales libres por calentamiento, y el radical libre desencadena entonces la polimerización de monómeros. El tamaño de las gotitas de las microcápsulas está controlado por parámetros físicoquímicos (viscosidad, densidades y tensión interfacial), parámetros del equipo (porosidad, diámetro de poro, diámetro del tubo y dimensión del agitador) y las condiciones de funcionamiento (caudal, presión) [64].

3.4.4.3. Polimerización en emulsión

Esto implica una emulsión en la que un monómero se emulsiona con tensioactivos en una fase acuosa. Las gotas líquidas de MCF que actúan como fase oleosa se dispersan en la solución acuosa. Los tensioactivos que tienen lados hidrófobos e hidrófilos se alinean alrededor de la interface entre monómeros en solución acuosa y gotitas líquidas del MCF. La parte hidrófila entra en contacto





con la solución acuosa y la parte hidrófoba entra en contacto con la gotita de líquido del MCF, lo anterior da como resultado el iniciador que desencadena la polimerización de las moléculas de monómero alrededor de la gotita esférica. Tales gotitas de emulsión con conchas de polímero formadas a lo largo de la solución acuosa dan como resultado una emulsión con hasta un 50 % de concentración de MCF microencapsulada suspendida [65], [66].

3.4.4.4. Poliadicción

Este tipo de método de formación de microcápsulas rellenas con MCF se basa en la reacción de poliadicción interfacial entre un monómero (σ) en la fase oleosa y un monómero (τ) en correspondencia en la fase acuosa, esto puede implicar la dispersión de una solución en fase oleosa del MCF y el monómero (σ) en otra solución en fase acuosa que contiene el monómero (τ), añadiendo luego un iniciador para generar la reacción de poliadicción entre el monómero (σ) y el monómero (τ). Una membrana de poliurea se forma casi instantáneamente en la superficie de las gotitas de la fase de aceite dispersada de la MCF [2].

3.5. Materiales termoquímicos de almacenamiento de calor

El sistema termoquímico de almacenamiento térmico [17], [67], [68] utiliza una reacción química reversible. La energía térmica almacenada es igual a la entalpía de reacción. Durante el proceso de carga, una reacción endotérmica hacia adelante absorbe el calor y la energía térmica absorbida se utiliza para disociar un reactivo químico (X_0) en los productos (X_1) y (X_2). Durante el proceso de descarga, los reactantes (X_1) y (X_2) experimentan una reacción exotérmica hacia atrás que produce (X_0), liberando calor en este proceso [69]. Los productos de ambas reacciones se pueden almacenar ya sea a temperatura ambiente o a temperatura de trabajo. La energía térmica almacenada en el material termoquímico puede expresarse como:

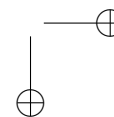
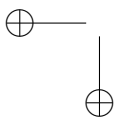
$$Q = n * \Delta H \quad (3)$$

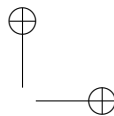
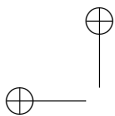
Donde

n : es el número molar del reactivo (mol).

ΔH : es la entalpía de reacción (kJ/mol).

La tecnología de almacenamiento termoquímico se encuentra todavía en fase de laboratorio, mientras que las tecnologías de calor sensible y latente están maduras y se encuentran en fase industrial. La densidad de energía almacenada en este proceso termoquímico es mayor comparada con los materiales de almacenamiento de calor sensibles y latentes. Los sistemas de acumulación térmica por calor sensibles, calor latente y termoquímico tienen una densidad volumétrica aproximada de almacenamiento de energía de 50, 100 y 500 kW*h/m³, respectivamente. La duración de la carga térmica es limitada en el caso de materiales de almacenamiento de calor sensibles y latentes debido a pérdidas térmicas. En el caso de almacenamiento termoquímico, es teóricamente ilimitada debido a pérdidas térmicas mínimas. La complejidad de la tecnología de acumulación térmica mediante un proceso termoquímico es considerable, frente a los procesos de almacenamiento por calor sensibles y latentes [70]. El primer paso para desarrollar un sistema AET termoquímico es la selección de la reacción y el estudio de sus características químicas y físicas, tales como la reversibilidad, la velocidad de reacción, las condiciones de funcionamiento (presión y temperatura)





y las propiedades cinéticas [1]. Los requisitos de un material de almacenamiento termoquímico adecuado son los siguientes:

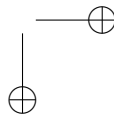
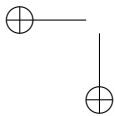
- La reacción endotérmica utilizada para el almacenamiento de calor debe ocurrir a una temperatura por debajo de 1273 K.
- La reacción exotérmica utilizada para recuperar el calor debe ocurrir a una temperatura por encima de 773 K.
- Las reacciones en ambos sentidos deben ser completamente reversibles sin reacciones secundarias.
- La gran entalpía de reacción y el pequeño volumen molar pueden maximizar la capacidad de almacenamiento de energía térmica.
- Los compuestos químicos de ambas reacciones se pueden manejar fácilmente.
- Los compuestos químicos no deben reaccionar con el medio ambiente.

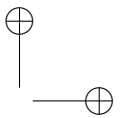
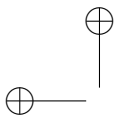
4. Discusión

El empleo de la energía solar térmica representa una fuente de energía renovable cada vez más atractiva; sin embargo, uno de los factores clave que determinan el desarrollo de esta tecnología es su integración a sistemas de almacenamiento de energía térmica, eficientes y rentable para superar el carácter intermitente de la luz solar y ser más económicamente competitivos [71], [72]. El considerable incremento en el número de investigaciones y patentes vinculadas con esta tecnología en los últimos años da fe del protagonismo de la acumulación térmica como práctica energética.

Un sistema AET consta de tres partes: medio de almacenamiento, intercambiador de calor y tanque de almacenamiento. El medio de almacenamiento puede operar por calor sensible, calor latente o mediante un proceso termoquímico [48], [73]. El propósito del intercambiador de calor es suministrar o extraer calor del medio de almacenamiento. El tanque de almacenamiento contiene el medio de almacenamiento y aísla el proceso del entorno. Los sistemas AET deben ser diseñados para cumplir con ciertos criterios, que dependen del tipo, tamaño y diseño de la aplicación [1], [37], [74].

Antes de elegir un sistema AET adecuado, es necesario realizar un análisis exhaustivo de todos los requisitos. El sistema AET debe ser compatible con todas las otras unidades de la instalación, además, debe ceñirse a la estrategia operativa global de la instalación como el rango de temperatura de funcionamiento, el número de horas de acumulación térmica demandado, la tasa de carga y descarga, la integración con el sistema de recolección solar, etc. Debe garantizarse su estabilidad en un gran número de ciclos, que tanto el contenedor como el medio de almacenamiento puedan soportar sin degradación de sus propiedades. La estabilidad a largo plazo del sistema puede verse comprometida por varios factores, una escasa estabilidad de las propiedades de los materiales sometidos a ciclos térmicos extensivos o corrosión e incompatibilidad química entre el MCF y su recipiente; por consiguiente, se debe elegir el material de almacenamiento más adecuado, el intercambiador





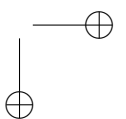
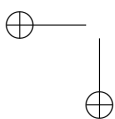
de calor entre el material de almacenamiento térmico y el fluido de transferencia de calor [9]. En el almacenamiento de energía térmica, actualmente las principales áreas de enfoque son la reducción de costos del material de almacenamiento, la reducción de costos de operación y la mejora en la viabilidad económica del almacenamiento de energía.

5. Conclusiones

Las aplicaciones para el AET pueden clasificarse como áreas de alta, media y baja temperatura. En el lado de alta temperatura, los materiales inorgánicos como las sales de nitrato son los materiales de almacenamiento de energía térmica más utilizados, mientras que en el lado medio y bajo, los materiales orgánicos como la parafina comercial son los más utilizados. La mejora de la conductividad térmica de los materiales de almacenamiento de energía térmica es un área de enfoque importante en las actuales investigaciones. Se están explorando tecnologías de fabricación rentables para MCF microencapsulado y materiales compuestos. La optimización de las propiedades termofísicas como el punto de fusión de los materiales de almacenamiento de energía térmica, se explora con técnicas como las mezclas eutécticas y la longitud de la cadena de hidrocarburos, etc. Para materiales de almacenamiento por calor sensibles y latentes, las tecnologías son bastante maduras y difundidas. Los materiales termoquímicos están todavía en fase de laboratorio, estos tienen un gran potencial como materiales de almacenamiento de energía térmica en el futuro debido a su gran capacidad de almacenamiento de energía por unidad de volumen.

Referencias

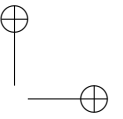
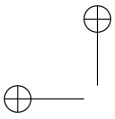
- [1] P. A. J. Donkers, L. C. Sögütöglü, H. P. Huinink, H. R. Fischer, and O. C. G. Adan, "A Review of Salt Hydrates for Seasonal Heat Storage in Domestic Applications", *Applied Energy*, Vol. 199, pp. 45-68, 2017. ↑145, 156, 160
- [2] B. Kanimozhi, B. R. Ramesh Babu, and V. Pranesh, "Thermal Energy Storage System Operating with Phase Change Materials for Solar Water Heating Applications: Doe Modelling", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 123, pp. 614-624, 2017. ↑145, 155, 159
- [3] G. Li and X. Zheng, "Thermal Energy Storage System Integration Forms for a Sustainable Future", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 62, pp. 736-757, 2016. ↑145, 146
- [4] J. Arévalo, F. Santos, and S. Rivera, "Application of Analytical Uncertainty Costs of Solar, Wind and Electric Vehicles in Optimal Power Dispatch", *Ingeniería*, Vol. 22, No. 3, pp. 152-161, 2017. ↑145
- [5] J. D. B. Rodríguez, C. A. Ramos-Paja, and E. F. Mejía, "Modeling and Parameter Calculation of Photovoltaic Fields in Irregular Weather Conditions", *Ingeniería*, Vol. 17, No. 1, pp. 37-48, 2012. ↑145
- [6] S. Pintaldi, S. Sethuvenkatraman, S. White, and G. Rosengarten, "Energetic Evaluation of Thermal Energy Storage Options for High Efficiency Solar Cooling Systems", *Applied Energy*, Vol. 188, pp. 160-177, 2017. ↑145
- [7] H. Shamsi, M. Boroushaki, and H. Geraei, "Performance Evaluation and Optimization of Encapsulated Cascade Pcm Thermal Storage", *Journal of Energy Storage*, Vol. 11, pp. 64-75, 2017. ↑145
- [8] J. A. G. Moreno, C. L. T. Rodríguez, and R. A. P. Suesca, "Generación Híbrida de Energía Eléctrica como Alternativa para Zonas no Interconectadas", *Ingeniería*, Vol. 12, No. 1, pp. 57-63, 2006. ↑145
- [9] F. Kleiner, K. Posern, and A. Osburg, "Thermal Conductivity of Selected Salt Hydrates for Thermochemical Solar Heat Storage Applications Measured by the Light Flash Method", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 113, pp. 1189-1193, 2017. ↑146, 150, 161
- [10] J. F. Burnham, "Scopus Database: a Review", *Biomedical Digital Libraries*, Vol. 3, No. 1, P. 1, 2006. ↑147
- [11] J. I. Beltrán, J. Wang, F. Montero-Chacón, and Y. Cui, "Thermodynamic Modeling of Nitrate Materials for Hybrid Thermal Energy Storage: Using Latent and Sensible Mechanisms", *Solar Energy*, Vol. 155, pp. 154-166, 2017. ↑149



- [12] A. Gil Et Al., “State of The Art on High Temperature Thermal Energy Storage for Power Generation. Part 1—Concepts, Materials and Modellization“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 1, pp. 31-55, 2010. ↑149
- [13] S. M. Hasnain, “Review On Sustainable Thermal Energy Storage Technologies, Part I: Heat Storage Materials and Techniques“, *Energy Conversion and Management*, Vol. 39, No. 11, pp. 1127-1138, 1998. ↑149
- [14] G. Murali and K. Mayilsamy, “Effect of Latent Thermal Energy Storage and Inlet Locations on Enhancement of Stratification in a Solar Water Heater Under Discharging Mode“, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 106, pp. 354-360, 2016. ↑149
- [15] T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T. El Rhafiki, and Y. Zeraoui, “Energy Storage: Applications and Challenges“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 120, pp. 59- 80, 2014. ↑150
- [16] S. Zou and X. Xie, “Simplified Model for Coefficient of Performance Calculation of Surface Water Source Heat Pump“, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 112, pp. 201- 207, 2017. ↑150
- [17] J. Lizana, R. Chacartegui, A. Barrios-Padura, and J. M. Valverde, “Advances in Thermal Energy Storage Materials and Their Applications Towards Zero Energy Buildings: a Critical Review“, *Applied Energy*, Vol. 203, pp. 219-239, 2017. ↑150, 159
- [18] M. Liu, W. Saman, and F. Bruno, “Review on Storage Materials and Thermal Performance Enhancement Techniques for High Temperature Phase Change Thermal Storage Systems“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 4, pp. 2118-2132, 2012. ↑150, 153
- [19] B. Xu, P. Li, and C. Chan, “Application of Phase Change Materials for Thermal Energy Storage in Concentrated Solar Thermal Power Plants: a Review to Recent Developments“, *Applied Energy*, Vol. 160, pp. 286-307, 2015. ↑150, 153
- [20] L. Nkhonjera, T. Bello-Ochende, G. John, and C. K. King’ ondu, “A Review of Thermal Energy Storage Designs, Heat Storage Materials and Cooking Performance of Solar Cookers with Heat Storage“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Article in Press 2016. ↑151
- [21] M. Hänchen, S. Brückner, and A. Steinfeld, “High-Temperature Thermal Storage Using a Packed Bed of Rocks—Heat Transfer Analysis and Experimental Validation“, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 10, pp. 1798-1806, 2011. ↑151
- [22] M. Martins, U. Villalobos, T. Delclos, P. Armstrong, P. G. Bergan, and N. Calvet, “New Concentrating Solar Power Facility for Testing High Temperature Concrete Thermal Energy Storage“, In *Energy Procedia*, Vol. 75, pp. 2144-2149, 2015. ↑151
- [23] V. A. Salomoni Et Al., “Thermal Storage of Sensible Heat Using Concrete Modules in Solar Power Plants“, *Solar Energy*, Vol. 103, pp. 303-315, 2014. ↑151
- [24] D. Schlipf, P. Schickanz, H. Maier, and G. Schneider, “Using Sand and Other Small Grained Materials as Heat Storage Medium in a Packed Bed Htess“, *Energy Procedia*, Vol. 69, pp. 1029-1038, 2015. ↑152
- [25] D. Zhitomirsky, E. Cho, and J. C. Grossman, “Solid-State Solar Thermal Fuels for Heat Release Applications“, *Advanced Energy Materials*, Vol. 6, No. 6, Art. No. 1502006, pp. 98-113, 2016. ↑152
- [26] S. Krishnan and B. Sivaraman, “Experimental Investigations On Thermal Storage in a Solar Dryer“, *International Energy Journal*, Vol. 17, No. 1, pp. 23-35, 2017. ↑152
- [27] B. Cárdenas and N. León, “High Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Phase Change Materials, Design Considerations and Performance Enhancement Techniques“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 27, pp. 724-737, 2013. ↑152, 156
- [28] G. Cáceres, M. Montané, S. Nasirov, and R. O’ryan, “Review of Thermal Materials for Csp Plants and Lcoe Evaluation for Performance Improvement Using Chilean Strategic Minerals: Lithium Salts and Copper Foams“, *Sustainability (Switzerland)*, Vol. 8, No. 2, Art. No. 106, pp. 62-77, 2016. ↑152
- [29] L. F. Cabeza Et Al., “Co₂/Inf₂2_i/Inf₂Mitigation Accounting for Thermal Energy Storage (Tes) Case Studies“, *Applied Energy*, Vol. 155, pp. 365-377, 2015. ↑152
- [30] P. Marin Et Al., “Energy Savings Due To The Use of Pcm for Relocatable Lightweight Buildings Passive Heating and Cooling in Different Weather Conditions“, *Energy and Buildings*, Vol. 129, pp. 274-283, 2016. ↑152
- [31] M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. K. Razack, and S. Al-Hallaj, “A Review On Phase Change Energy Storage: Materials and Applications“, *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, No. 9, pp. 1597-1615, 2004. ↑152, 153, 155
- [32] W. Su, J. Darkwa, and G. Kokogiannakis, “Review of Solid–Liquid Phase Change Materials and Their Encapsulation Technologies“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 48, pp. 373-391, 2015. ↑152
- [33] H. Akeiber Et Al., “A Review On Phase Change Material (Pcm) for Sustainable Passive Cooling in Building

- Envelopes“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 60, pp. 1470-1497, 2016. ↑[153](#)
- [34] R. Sharma, P. Ganesan, V. Tyagi, H. Metselaar, and S. Sandaran, “Developments in Organic Solid–Liquid Phase Change Materials and Their Applications in Thermal Energy Storage“, *Energy Conversion and Management*, Vol. 95, pp. 193-228, 2015. ↑[153](#), [158](#)
- [35] K. Pielichowska and K. Pielichowski, “Phase Change Materials for Thermal Energy Storage“, *Progress in Materials Science*, Vol. 65, pp. 67-123, 2014. ↑[153](#), [154](#), [155](#)
- [36] H. Ghasemi Bahraseman, E. M. Languri, and J. East, “Fast Charging of Thermal Energy Storage Systems Enabled by Phase Change Materials Mixed with Expanded Graphite“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 109, pp. 1052-1058, 2017. ↑[153](#), [156](#), [157](#)
- [37] P. Feliński and R. Sekret, “Experimental Study of Evacuated Tube Collector/Storage System Containing Paraffin As a Pcm“, *Energy*, Vol. 114, pp. 1063-1072, 2016. ↑[153](#), [160](#)
- [38] R. K. Sharma, P. Ganesan, V. V. Tyagi, H. S. C. Metselaar, and S. C. Sandaran, “Developments in Organic Solid-Liquid Phase Change Materials and Their Applications in Thermal Energy Storage“, *Energy Conversion and Management*, Vol. 95, pp. 193- 228, 2015. ↑[154](#)
- [39] F. J. Ruiz-Cabañas, A. Jové, C. Prieto, V. Madina, A. I. Fernández, and L. F. Cabeza, “Materials Selection of Steam-Phase Change Material (Pcm) Heat Exchanger for Thermal Energy Storage Systems in Direct Steam Generation Facilities“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 159, pp. 526-535, 2017. ↑[154](#)
- [40] A. Safari, R. Saidur, F. Sulaiman, Y. Xu, and J. Dong, “A Review On Supercooling of Phase Change Materials in Thermal Energy Storage Systems“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 70, pp. 905-919, 2017. ↑[154](#)
- [41] E. P. Del Barrio, R. Cadoret, J. Daranlot, and F. Achchaq, “New Sugar Alcohols Mixtures for Long-Term Thermal Energy Storage Applications at Temperatures Between 70°C and 100°C“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 155, pp. 454-468, 2016. ↑[154](#)
- [42] N. Sarier and E. Onder, “Organic Phase Change Materials and Their Textile Applications: an Overview“, *Thermochimica Acta*, Vol. 540, pp. 7-60, 2012. ↑[154](#)
- [43] A. Gutierrez Et Al., “Characterization of Wastes Based On Inorganic Double Salt Hydrates as Potential Thermal Energy Storage Materials“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 170, pp. 149-159, 2017. ↑[154](#)
- [44] S. A. Mohamed Et Al., “A Review on Current Status and Challenges of Inorganic Phase Change Materials for Thermal Energy Storage Systems“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 70, pp. 1072-1089, 2017. ↑[154](#)
- [45] J. Trahan, S. Kuravi, D. Y. Goswami, M. Rahman, and E. Stefanakos, “Thermal Characterization of High Temperature Inorganic Phase Change Materials for Thermal Energy Storage Applications“, In *Asme 2012 6th International Conference on Energy Sustainability, ES 2012, Collocated with The Asme 2012 10th International Conference On Fuel Cell Science, Engineering and Technology*, pp. 623-630. San Diego: American Society of Mechanical Engineers, pp. 41-56, 2012. ↑[155](#)
- [46] F. Guarino, A. Athienitis, M. Cellura, and D. Bastien, “PCM Thermal Storage Design in Buildings: Experimental Studies and Applications to Solaria in Cold Climates“, *Applied Energy*, Vol. 185, pp. 95-106, 2017. ↑[155](#)
- [47] D. Zhang and X. Ke, “Study of Phase Change Energy Storage Technology Development and Policy of Peak-Valley Electric Price“, *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, Vol. 32, No. 5, pp. 3993-4004, 2014. ↑[155](#)
- [48] G. Alva, L. Liu, X. Huang, and G. Fang, “Thermal Energy Storage Materials and Systems for Solar Energy Applications“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 68, pp. 693-706, 2017. ↑[155](#), [160](#)
- [49] S. Pincemin, R. Olives, X. Py, and M. Christ, “Highly Conductive Composites Made of Phase Change Materials and Graphite for Thermal Storage“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 92, No. 6, pp. 603-613, 2008. ↑[156](#)
- [50] C. Zhu and B. Li, “Research Status of Phase Change Thermal Storage Material Applied for Solar Heating“, *Materials China*, Vol. 36, No. 3, pp. 236-240, 2017. ↑[156](#)
- [51] A. Karaipekli and A. Sari, “Development and Thermal Performance of Pumice/Organic Pcm/Gypsum Composite Plasters for Thermal Energy Storage In Buildings“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 149, pp. 19-28, 2016. ↑[156](#)
- [52] A. Sari and A. Karaipekli, “Thermal Conductivity and Latent Heat Thermal Energy Storage Characteristics of Paraffin/Expanded Graphite Composite as Phase Change Material“, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, No. 8, pp. 1271-1277, 2007. ↑[156](#)
- [53] T. Xu, Y. Li, J. Chen, and J. Liu, “Preparation and Thermal Energy Storage Properties of Lino3-Kcl-Nano3/Expanded Graphite Composite Phase Change Material“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 169,

- pp. 215-221, 2017. ↑ [156](#)
- [54] X. Huang, G. Alva, L. Liu, and G. Fang, "Preparation, Characterization and Thermal Properties of Fatty Acid Eutectics/Bentonite/Expanded Graphite Composites as Novel Form-Stable Thermal Energy Storage Materials", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 166, pp. 157-166, 2017. ↑ [157](#)
- [55] C. D. S. Brites Et Al., "Tethering Luminescent Thermometry and Plasmonics: Light Manipulation To Assess Real-Time Thermal Flow in Nanoarchitectures", *Nano Letters*, Vol. 17, No. 8, pp. 4746-4752, 2017. ↑ [157](#)
- [56] J. Khodadadi, L. Fan, and H. Babaei, "Thermal Conductivity Enhancement of Nanostructure-Based Colloidal Suspensions Utilized as Phase Change Materials for Thermal Energy Storage: a Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 24, pp. 418-444, 2013. ↑ [157](#)
- [57] M. Kibria, M. Anisur, M. Mahfuz, R. Saidur, and I. Metselaar, "A Review on Thermophysical Properties of Nanoparticle Dispersed Phase Change Materials", *Energy Conversion and Management*, Vol. 95, pp. 69-89, 2015. ↑ [157](#)
- [58] W. Liang Et Al., "Halloysite Clay Nanotubes Based Phase Change Material Composites with Excellent Thermal Stability for Energy Saving and Storage", *Rsc Advances*, Vol. 6, No. 24, pp. 19669-19675, 2016. ↑ [157](#)
- [59] Z. Ma, W. Lin, and M. I. Sohel, "Nano-Enhanced Phase Change Materials for Improved Building Performance", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, pp. 1256-1268, 2016. ↑ [157](#)
- [60] K. Kaygusuz and A. Sari, "High Density Polyethylene/Paraffin Composites as Form-Stable Phase Change Material for Thermal Energy Storage", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, Vol. 29, No. 3, pp. 261-270, 2007. ↑ [157](#)
- [61] A. Sari, "Form-Stable Paraffin/High Density Polyethylene Composites as Solid-Liquid Phase Change Material for Thermal Energy Storage: Preparation and Thermal Properties", *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, No. 13, pp. 2033-2042, 2004. ↑ [157](#)
- [62] J. Li, P. Xue, W. Ding, J. Han, and G. Sun, "Micro-Encapsulated Paraffin/High-Density Polyethylene/Wood Flour Composite as Form-Stable Phase Change Material for Thermal Energy Storage", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 93, No. 10, pp. 1761-1767, 2009. ↑ [158](#)
- [63] C. Liu, L. Ma, Z. Rao, and Y. Li, "Synthesis and Thermal Properties of Magnesium Sulfate Heptahydrate/Urea Resin as Thermal Energy Storage Micro-Encapsulated Phase Change Material", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 140, No. 1, Art. No. 014501, pp. 231-248, 2018. ↑ [158](#)
- [64] Z. Qiu, X. Ma, P. Li, X. Zhao, and A. Wright, "Micro-Encapsulated Phase Change Material (Mpcm) Slurries: Characterization and Building Applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 77, pp. 246-262, 2017. ↑ [158](#)
- [65] W. Su, J. Darkwa, and G. Kokogiannakis, "Review of Solid-Liquid Phase Change Materials and Their Encapsulation Technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 48, pp. 373-391, 2015. ↑ [159](#)
- [66] E. Oró, A. De Gracia, A. Castell, M. M. Farid, and L. F. Cabeza, "Review On Phase Change Materials (Pcms) for Cold Thermal Energy Storage Applications", *Applied Energy*, Vol. 99, pp. 513-533, 2012. ↑ [159](#)
- [67] P. Pardo, A. Deydier, Z. Anxionnaz-Minvielle, S. Rougé, M. Cabassud, and P. Cognet, "A On High Temperature Thermochemical Heat Energy Storage", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 32, pp. 591-610, 2014. ↑ [159](#)
- [68] U. Pelay, L. Luo, Y. Fan, D. Stitou, and M. Rood, "Thermal Energy Storage Systems for Concentrated Solar Power Plants", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 79, pp. 82-100, 2017. ↑ [159](#)
- [69] M. Bhourri and I. Bürger, "Numerical Investigation of H₂ Absorption in An Adiabatic High-Temperature Metal Hydride Reactor Based On Thermochemical Heat Storage: MgH₂ and Mg(OH)₂ as Reference Materials", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 26, pp. 16632-16644, 2017. ↑ [159](#)
- [70] A. Jabbari-Hichri, S. Bennici, and A. Auroux, "CaCl₂-Containing Composites as Thermochemical Heat Storage Materials", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 172, pp. 177-185, 2017. ↑ [159](#)
- [71] A. Krothapalli and B. Greska, "Concentrated Solar Thermal Power", In *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation*, Second Edition, Vol. 2: Springer International Publishing, pp. 1503-1536, 2016. ↑ [160](#)
- [72] L. Xie, L. Tian, L. Yang, Y. Lv, and Q. Li, "Review On Application of Phase Change Material in Water Tanks", *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 9, No. 7, pp. 203-214, 2017. ↑ [160](#)
- [73] S. Kuravi, J. Trahan, D. Y. Goswami, M. M. Rahman, and E. K. Stefanakos, "Thermal Energy Storage Technologies and Systems for Concentrating Solar Power Plants", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 39, No. 4, pp. 285-319, 2013. ↑ [160](#)
- [74] A. Datas, A. Ramos, A. Martí, C. Del Cañizo, and A. Luque, "Ultra High Temperature Latent Heat Energy Storage and Thermophotovoltaic Energy Conversion", *Energy*, Vol. 107, pp. 542-549, 2016. ↑ [160](#)

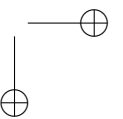
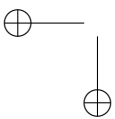


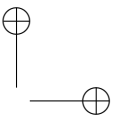
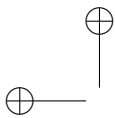
D. Bravo

Debrayan Bravo Hidalgo

Ingeniero Mecánico, Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”; magíster en Eficiencia Energética, Universidad de Cienfuegos; fue docente investigador, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA), Universidad de Cienfuegos; editor de la Revista Publicando del grupo empresarial Research Management Learning (RML), Quito, Ecuador.

Correo electrónico: dbravo@rmlconsultores.com





Research

REVISTA
Ingeniería

Forecasting Latin-American Currency Exchange using Models with Static and Stochastic Volatility

Pronóstico de divisas latinoamericanas con modelos de Volatilidad Estática y Estocástica

Laura Camila Roldán Martínez¹

¹Universidad Piloto de Colombia

Correspondence: roldan.lc@hotmail.com

Recibido: 20/12/2017. Modificado: 02/05/2018. Aceptado: 24/05/2018.

Abstract

Context: The currency market is known as the most liquid market in the financial system. Its strong repercussion in the economy is tied to the capitalization and the impulse that this market offers through the increase of investments and therefore of macroeconomic effects that is found in the development of the economy. For these reasons, it is relevant to study models that predict the behavior of the main Latin currencies.

Method: Two models are proposed for the prognosis and the identification of factors implicit in the behavior of these currencies. The first proposed model corresponds to the Black-Scholes, which allows obtaining the future price of the currency based on integrating price processes, a Wiener process and a static volatility is recognized. The second model is Heston, which describes the evolution of the volatility of an underlying asset and assumes a stochastic volatility.

Results: After the application of the proposed models, their efficiency are evaluated by means of the Diebold-Mariano Test, in order to identify the forecast model that best adapts models, their efficiency are to the real behavior of the parities.

Conclusions: It is identified that the Heston model offers a better fit to the forecast, assuming random volatility in the short term for each of the currencies, while the long term presents the largest adjustment of the Black & Scholes model, It is evident that the longer the forecast time, the greater the uncertainty and the greater the prediction error.

Keywords: Black-Scholes, Diebold-Mariano, currencies, Heston, Parities, forecast.

Language: Spanish

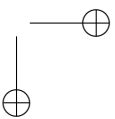
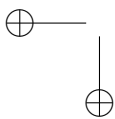
Open access



Cite this work as: L. C. Roldán, "Forecasting Latin-American Currency Exchange using Models with Static and Stochastic Volatility", Ingeniería, vol. 23, no. 2, pp. 166-189, 2018.

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

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.12726>



Resumen

Contexto: El mercado de divisas es conocido como el mercado más líquido en el sistema financiero. Su fuerte repercusión en la economía se encuentra atada a la capitalización y el impulso que este mercado proporciona a través del aumento de las inversiones y por ende de efectos macroeconómicos que se encuentra implícitos en el desarrollo de la economía. Por esta razón, es relevante estudiar modelos de predicción del comportamiento de las principales divisas latinas.

Método: Se plantean dos modelos para el pronóstico y la identificación de factores implícitos en los comportamientos de estas monedas. El primer modelo planteado corresponde al de Black-Scholes, el cual permite obtener el precio futuro de la divisa basándose en procesos de precio integrando, un proceso Wiener y se reconoce una volatilidad estática. El segundo modelo es Heston, el cual describe la evolución de la volatilidad de un activo subyacente y asume una volatilidad estocástica. En la presente investigación.

Resultados: Luego de la aplicación de las dos metodologías que se propusieron se evalúa la eficiencia de los dos modelos por medio del Test de Diebold-Mariano, con el fin de identificar el modelo de pronóstico que mejor se adapta al comportamiento real de las paridades.

Conclusiones: En resultado de la investigación se identifica que modelo de Heston brinda un mejor ajuste al pronóstico, asumiendo volatilidad aleatoria en el corto plazo para cada una de las divisas, mientras que al largo plazo presenta mayor ajuste el modelo Black-Scholes, se evidencia que cuanto mayor sea el tiempo de pronóstico, mayor incertidumbre se presentará y mayor error de predicción.

Palabras clave: Black-Scholes, Diebold-Mariano, divisas, Heston, paridades, pronóstico.

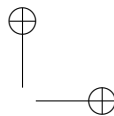
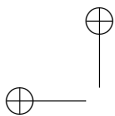
Idioma: Español

1. Introducción

La predicción de entornos dinámicos ha tomado relevancia a través de los años y con la aleatoriedad de sistemas cambiarios relativamente flexibles [1], los cuales han incrementado el inclinado interés en la predicción de estos entornos. Un ejemplo claro de esto, es el mercado de divisas, el cuál es uno de los activos financieros más transados y volátiles a nivel mundial. Las divisas corresponden a un mercado de tipo flotación libre, es decir, responde a estímulos como: flujos de capital, importaciones y exportaciones, inflación, entre otros. Concerniente a esto, los bancos centrales se convierten en uno de los agentes del mercado financiero interesados en predecir futuras fluctuaciones, importantes para la toma de decisiones en políticas macroeconómicas.

En correspondencia a lo anterior, América Latina constituye una de las zonas con mayor volatilidad e impacto en sus tasas de cambio, por concernir a una economía emergente y por sus fuertes lazos de comercio internacional con países desarrollados especialmente con Estados Unidos, es por ello, que la presente investigación se centra en desarrollo el pronóstico de divisas latinoamericanas, frente al dólar, de los países de Colombia, México, Brasil, Argentina, Perú y Chile, en el periodo de 2014-2017 con un horizonte de tiempo de uno y veintidós días.

La investigación sobre pronóstico en estas divisas, se desarrollan mediante procesos de difusión del modelo Black-Scholes, que asume volatilidad constante y el modelo de Heston, que asume volatilidad estocástica, estos modelos permiten explicar el pronóstico de las divisas, teniendo en cuenta el factor de la volatilidad, finalmente, estos son evaluados por medio de criterios de selección de indicadores estadísticos como el RSME, Promedio de Errores al Cuadrado, y el test de Diebold-Mariano, teniendo en cuenta



criterios de predicción de modelos lineales aplicados generalmente en las predicciones desarrolladas por bancas centrales.

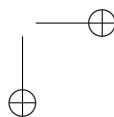
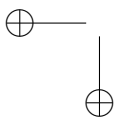
2. Antecedentes

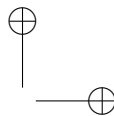
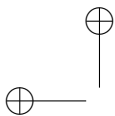
Derivado de la alta volatilidad que presenta el mercado de divisas y la necesidad de explicar su comportamiento, se han realizado diferentes investigaciones, en el contexto latinoamericano, que permiten evidenciar la importancia y del estudio y evaluación de estos activos financieros, por lo que se convierten en el punto de partida para el desarrollo de la presente investigación.

En el contexto colombiano, [2] presenta la evaluación del impacto de las intervenciones cambiarias sobre el nivel y la volatilidad de la tasa de cambio en Colombia sobre las compras de divisas durante el período 2000 – 2008. En este lapso de tiempo, se compran US 18.000 millones con cambios significativos de intensidad en ciertos años que devaluó la tasa de cambio y redujo su volatilidad. Este trabajo utiliza metodologías que permiten evaluar la estabilidad de los parámetros de la ecuación de media y de volatilidad para el modelo E-GARCH en forma simultánea.

Es importante tener en cuenta que la aplicación de metodologías que permitan la caracterización de la variabilidad en los rendimientos de los mercados bursátiles son características importantes para representar el comportamiento financiero, por lo que el presente estudio [3] aplica como método que permite asignar el modelo que mejor se ajusta a la predicción de la serie, por medio de la aplicación de un modelo ARIMAX y un modelo SONFS para la serie colombiana Pacific Rubiales en una prueba de aleatoriedad, homoscedasticidad y ausencia de correlación. Esta investigación permite evidenciar la importancia que tiene la inclusión de nuevas variables que permitan la reducción desde un punto de vista más aproximado, teniendo en cuenta patrones de variabilidad dentro de la acción de Pacific Rubiales, pruebas que permitan ver las bondades de la aplicación no solo de procesos autorregresivos, sino de modelos computacionales que faciliten la sincronización de nuevas técnicas.

De otro modo, se encuentran otro tipo de aplicaciones en este caso el de un modelo RLS (Regresión lineal simple) [4], donde se identificó la volatilidad de los retornos diarios para Argentina, Brasil, Chile, México y Perú. La volatilidad en estos mercados latino es evidente, por lo cual se reemplazan los modelos de probabilidad constante por un modelo que permita registrar los cambios de probabilidad en donde se registren pérdidas en sus retornos. Teniendo en cuenta la magnitud y dirección de estas variaciones que derivan el cambio en los niveles habituales de los retornos y por ende de los precios desviando la velocidad de reversión a su media. Por lo anterior, este estudio aplica bajo la perspectiva del modelo básico de RLS una variables sobre la combinación de probabilidades variable y un RLS que tuvo en cuenta la reversión a su media, permitiendo así tener en cuenta que los parámetros son variables altamente significativas que tienen especial importancia bajo la metodología de la reversión a la media como factor principal. El muestreo aleatorio se encuentra implícito en la estimación de factores temporales, es por ello que este estudio aplica no solo la variabilidad de la metodología RLS, sino, además de ello, la inclusión de modelos donde la presencia del cambio de nivel cobra vital importancia, modelos ARFIMA y GARCH en donde los efectos son de memoria larga y considera la predicción de la historia, a diferencia de los modelos RLS donde todas sus variables inciden que es mejor pronosticar en un conjunto de variabilidades.





En cuanto a la evaluación de pronóstico, [5] hacen una evaluación para la tasa de cambio en Colombia y se analiza la capacidad de predicción dentro de la muestra de cuatro modelos de tasa de cambio nominal durante el período 1984 - 2004. A través de los años, Colombia ha cambiado sus modelos económicos conocidos, pero recientemente los movimientos de la tasa de cambio no pueden ser explicados por los modelos convencionales; sin embargo, se evalúan modelos de la década de 1990 que pueden explicar los movimientos de la tasa de cambio actual para lo cual se usa el error medio al cuadrado y el coeficiente de desigualdad de Thell, estos se comparan con un camino aleatorio y la condición de paridad del poder adquisitivo, lo que arrojó como resultado en el documento que ningún modelo logra superar al camino aleatorio.

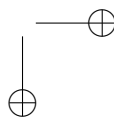
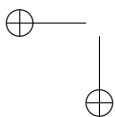
Teniendo en cuenta la afinidad y la vinculación ente las finanzas y la valoración de estas en relación con los riesgos asociados, es importante tener en cuenta [6] la repercusión económica con la que cuenta en el sector financiero y la aplicación de otras que permitan la aproximación a la valoración de los mercados, este estudio permite la asociación del mercado MILA (Mercado Integrado Latinoamericano) por medio del CAMP, teniendo en cuenta la rentabilidad que se espera del mismo y la aproximación teórica con el entorno.

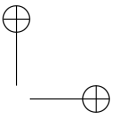
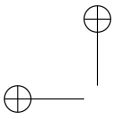
El mercado financiero colombiano se ha visto afectado a través del año por la volatilidad presente en el tipo de cambio USD/COP [7], partiendo de esto, se propone una nueva metodología de pronóstico planteada por la cual consiste en mejorar la predicción de la TRM por medio de la aplicación de los modelos bayesianos, la cual tiene como factor principal la información histórica presente en el comportamiento de la TRM en el mercado.

Otro estudio relacionado al pronóstico de divisas, lo realiza [8] sobre las tasas de cambio del yen japonés mediante redes neuronales artificiales, donde muestra la aplicabilidad de las redes neuronales artificiales al mercado de divisas mediante el estudio de la tasa de cambio del yen japonés con respecto al dólar americano. Según estudios, las predicciones otorgadas por un modelo estocástico lineal no son tan precisas como las que entregan las no lineales, debido al comportamiento no lineal de las tasas de cambio esto lleva a necesitar nuevos métodos de estudio basados en redes neuronales, ya que estas permiten establecer relaciones lineales y no lineales; para ello, se le da a la red neuronal dos tipo de datos, un histórico de serie de datos y los seis indicadores económicos que más afectan el comportamiento del dólar americano.

Por su parte, [9] realiza la investigación sobre el pronóstico de la volatilidad del tipo de cambio, donde hace una comparación entre combinaciones de pronósticos de volatilidad en opciones y series de tiempo comparado con series individuales y pronósticos híbridos, dando a conocer una superioridad de las combinaciones de pronósticos de la volatilidad. La aplicación es para pronósticos de volatilidad del tipo de cambio peso mexicano frente a dólar estadounidense, los resultados muestran que la combinación del pronóstico GARCH y los pronósticos de IV del tipo de cambio son superiores, afirmando que las combinaciones de modelos son mejores que las series individuales.

Referente a la investigación que plantea [10] sobre la valuación de opciones europeas con el modelo de volatilidad de Heston, se desarrolla uno de los principales productos negociados en las bolsas de derivados en México haciendo una comparación entre la fórmula de Black-Scholes para la evaluación de opciones, teniendo en cuenta que uno de los supuestos argumentados por esta metodología no es acorde





con la evolución del mercado, por ello, se genera una discrepancia entre la valoración de este en comparación con el modelo de Heston de volatilidad estocástica, donde se quiere verificar empíricamente, el parámetro de correlación controla el sesgo de la función de la densidad de Heston.

Dichas investigaciones, se convierten en insumos básicos para el desarrollo de la presente investigación referente al pronóstico de divisas latinoamericanas y permiten validar la importancia de investigar estos temas de gran impacto en el mercado financiero y real.

3. Marco teórico

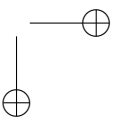
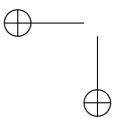
Se asume que los rendimientos de las divisas manifiestan un comportamiento de distribución normal, por lo tanto, aplicándolo a la teoría de movimientos brownianos y a los procesos de difusión, se identifican que se pueden modelar los mismos asumiendo $\mu = 0$ y $\sigma = \sqrt{t}$, puesto que se encuentran en un espacio muestral ω . Por lo anterior, se evalúa el comportamiento de las divisas latinoamericanas mediante estos procesos de difusión que buscan la manera de medir los rendimientos de futuros a partir de información histórica o aportadas por las $[F]$, quienes proporcionan la información de los modelos, por lo que se adaptan estos procesos.

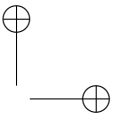
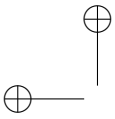
3.1. Teoría de probabilidad

En el ámbito financiero muy poco se conoce sobre las áreas de conexión que permiten entender el contexto matemático que integra las finanzas tal y como se conocen, en este contexto, la matemática brinda un factor fundamental integrado especialmente por la teoría de la probabilidad y de todos los procesos estocásticos, que desde el punto de vista matemático-financiero ha permitido concebir de manera más consistente lo que en la última década se ha conocido en las finanzas como su componente matemático. Teniendo en cuenta lo anterior, todos los procesos matemáticos que sobrevienen en el ámbito financiero ocurren dentro del espacio de probabilidad comprendido por eventos aleatorios, aquellos que no se pueden predecir dentro de los números reales; por lo tanto, todo aquello que ocurre en un ámbito financiero es conocido como una probabilidad (Ω, F, \mathbf{P}) , donde cada una de estas partes conforma el cálculo de probabilidades dentro de un posible evento aleatorio X en un valor real a partir de una función $f(x)$ definida en Ω con un espacio de probabilidad en un intervalo $[0,1]$. En términos financieros la probabilidad se define como [11] “El valor fijo límite hacia el que tiende a aproximarse la frecuencia de aparición de un resultado cuando crece el número de observaciones que se realizan en situaciones similares”, lo que quiere decir que la probabilidad de los eventos financieros se encuentra directamente asociada con la recurrencia de los sucesos, permitiendo de esta forma predecir en cierta manera qué acontecimiento puede o no ocurrir dentro del rango de probabilidad definido $[0,1]$, teniendo en cuenta la esperanza del suceso o evento $E(X)$. De lo anterior se difiere que: teniendo un conjunto Ω y F un σ -álgebra de subconjuntos de Ω , donde se define una filtración $[F_t](t \geq 0)$ como una familia de subconjuntos σ -álgebra F [11]. En un proceso estocástico se genera una filtración dada por

$$F_t^x = \sigma(X_s); 0 \leq s \leq t \tag{1}$$

Cabe destacar que un proceso estocástico X es adaptado a una filtración F_t para cada $t \geq 0, X_t$, donde es una variable aleatoria F_t medible.





3.2. Modelos de proceso de difusión

Es una variable aleatoria x_t , la cual no se discierne, se comporta a futuro, se conoce que cuenta con dos parámetros μ y σ , de lo cual se infiere que cada uno de estos parámetros tiene validez dentro de los procesos de difusión propuestos y generar de esta manera posibles comportamientos en un horizonte de tiempo futuro.

Movimiento browniano

La observación de un movimiento aleatorio de una partícula suspendida en un fluido produjo quizá el modelo matemático más importante en la predicción de variables aleatorias, mejor definido como el movimiento browniano. En 1826 Robert Brown observó en las partículas de polen sumergidas en un fluido (líquido o gas) un movimiento aleatorio producido por los choques contra moléculas de dicho fluido; desde entonces cautivó la atención de sin fin de científicos hasta que, posteriormente, Bachelier (en 1900) introduce el movimiento browniano (MB) para modelar las fluctuaciones de la bolsa parisina. El MB o proceso de Wiener en (Ω, F, \mathbf{P}) es un proceso aleatorio, definido [14]:

$$W = (W_t)_{t \geq 0} \quad (2)$$

Donde se infiere que:

- Sus trayectorias son continuas, sus incrementos son independientes. Si $0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_n$ entonces [12]:

$$W_{t_1}, W_{t_2} - W_{t_1}, \dots, W_{t_n} - W_{t_{n-1}} \quad (3)$$

- Son variables independientes.
- $W_t = 0$, $W_t - W_s$ representan una variables gaussiana con media cero y varianza $t - s$, es decir [12]

$$W_t - W_s \sim N(0, t - s) \quad (4)$$

Donde se debe tener en cuenta que X se comporta de manera normal cuando: $(X \sim N(\mu, \sigma^2))$, hay una distribución de probabilidad comprendida por [12]

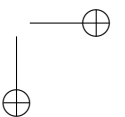
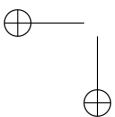
$$\Phi(X) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma}} e^{-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma^2}} du \quad (5)$$

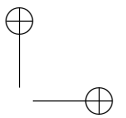
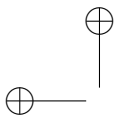
Para tener en cuenta:

Movimiento browniano, proceso de trayectoria continua que se encuentra definido por (Ω, F, \mathbf{P}) , Donde:

- $B_0 = 0$.
- $B_t - B_s$ independiente a F_s y distribuido normalmente $[0, 1]$.

El movimiento browniano es un proceso gaussiano, ya que cuenta con $\sigma^2 = 1$, se dice que (W_t) es un MB estándar; sin embargo, si lo anterior no se cumple se puede realizar un cambio de variable $T = \sigma^2 t$ o al considerar un nuevo espacio que se encuentra definido por $\frac{W_t}{\sigma}$.





De lo anterior se define que $W_t \sim N(0, t)$. Donde se asegura que los movimientos dados por los incrementos en el precio son estacionarios.

El MB, teniendo en cuenta las trayectorias continuas, quiere decir, que siempre existe una versión continua que defina MB (W_t), lo que quiere decir que la normalidad, los incrementos dados en los precios son continuos.

Un movimiento browniano (W_t) cumple :

1. Covarianza $\gamma(t, s) = cov(W_t, W_s) = \min t, s$.
2. Variación cuadrática en las trayectorias sobre $[0, T]$ es $t\mathbb{P} - c.s$.
3. Variación en las trayectorias sobre $[0, T]$ es $t\mathbb{P} - c.s$.

Movimiento Geométrico Browniano

Un movimiento browniano W_t definido por [12]:

$$Y_t = \exp(\sigma W_t + \mu t) \quad (6)$$

Donde se deduce que el proceso definido por Y_t es un movimiento geométrico browniano, el cual es obtenido a partir de una transformación exponencial del movimiento browniano con derivada, el cual se encuentra definido como [12]:

$$X_t = \sigma W_t + \mu t \implies \mu \in \mathbb{R}, \sigma \leq 0 \quad (7)$$

Donde se parte para determinar un t fijo, la v.a Y_t tienen una distribución log-normal con [12]:

- Media μt .
- varianza $\sigma^2 t$.
- es decir : $\ln(Y_t) \sim N(\mu t, \sigma^2 t)$.

El movimiento geométrico browniano (Y_t) se define [12]:

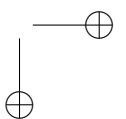
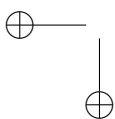
$$Y_t = Y_0 \exp(X_t) \quad (8)$$

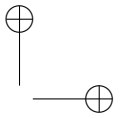
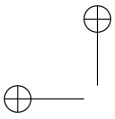
- Donde Y_0 puede tomar valores de cualquier variable aleatoria.

Este movimiento representa la tendencia y la variabilidad de los precios de los instrumentos de forma exponencial, su aplicación a través del promedio de los rendimientos y la forma en la que se implementa el proceso de difusión, permiten obtener buenos resultados de forma sencilla.

Black-Scholes

Uno de los principales modelos que tiene su mayor utilidad para simular y modelar el comportamiento de activos financieros es el modelo de Black-Scholes, ya que este incluye μ , σ dentro de sus parámetros y, además de ello, utiliza el método de difusión del movimiento browniano, de esta manera, a través de (6), se genera el modelo de Black-Scholes.





Basado en el movimiento geométrico browniano, [15] implementaron uno de los primeros modelos para explicar los cambios en los rendimientos de los instrumentos financieros, este modelo consta de una ecuación que permite determinar el precio de uno o más activos financieros.

El modelo tiene un continuo de ciclos comprendidos en $t \in [0, T]$ y consta de dos activos [15].

- $B = (B_t)_{t \in [0, T]}$ que evoluciona determinísticamente según:

$$\frac{dB_t}{B_t} = rdt \quad B_0 = 1 \quad (9)$$

Donde r es la tasa de interés presente en cada magnitud de tiempo. B representará el bono final.

Dado los anteriores conceptos que permiten definir y conceptualizar todos los acontecimientos aleatorios que suceden dentro del campo probabilístico y financiero, se presenta el modelo Heston, el cual obtiene las características de las probabilidades neutrales al riesgo, a partir de las cuales se obtiene la fórmula Black-Scholes (1972) para evaluar opciones o bajo metodologías de pronóstico.

Fisher Black y Myron Scholes proponen un modelo de valoración de opciones que permite, a través de una ecuación diferencial estocástica, calcular el precio de un activo. Uno de sus parámetros a tener en cuenta es la volatilidad del precio de un activo y su tasa libre de riesgo, la volatilidad en este modelo es considerada constante, por lo tanto, al hacerla variable podía extender de manera natural a un modelo más complejo. El modelo de Heston describe el cambio en el precio de un activo, asumiendo que la volatilidad es variable y estocástica.

En el modelo de Black-Scholes asume una variación en el precio de un activo (S_t) en un periodo de tiempo (dt) que será igual al precio en un instante de tiempo (t) por su tasa de crecimiento/decrecimiento (r), más el cambio generado por la volatilidad, el cual se modela por medio de una constante (\sqrt{v}) multiplicado por el crecimiento de un movimiento geométrico browniano (W_1) evidenciado en la ecuación (10) que se puede encontrar en [16].

$$dS_t = S_t r dt + \sqrt{v} S_t dW_1 \quad (10)$$

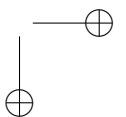
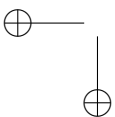
Teniendo en cuenta un modelo de volatilidad estocástica en donde se agrega una ecuación extra a la actual para evidenciar la correlación existente entre dos movimientos brownianos que posee un sistema en concreto, el modelo de Heston se representa de la siguiente manera:

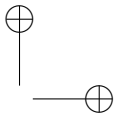
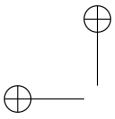
$$dS_t = S_t(\mu) S_t dt + \sqrt{v} S_t dW_1 \quad (11)$$

$$dv_t = k(\theta - v_t) dt + \sigma \sqrt{v} dW_2 \quad (12)$$

Donde:

- Para una tasa de cambio (S_t), la cual representa el precio de una divisa en términos de otra.
- W_1 y W_2 son movimientos brownianos con correlación, de lo cual se entiende que cuando uno de los procesos manifiesta un incremento el otro lo hará de la misma forma o, por el contrario, si uno se manifiesta decreciente el otro lo tendrá.





El modelo de Black-Scholes cuenta con ciertos supuestos: (a) el activo constituye una acción que no genera dividendos. (b) el precio del activo es dirigido por un movimiento geométrico browniano, es decir, el precio tiene un comportamiento log-normal y los rendimientos del mismo son de comportamiento común; (c) el principal supuesto se define en que la volatilidad del precio del activo se mantiene constante a través del tiempo, es decir, que es constante; (d) el mercado es líquido y divisible; es decir, podemos vender o comprar el activo en cualquier fracción de unidad.

Como se evidenció anteriormente, para obtener el proceso de Black-Scholes se considera un movimiento browniano $(W_t)_{t \in [0, t]}$ definido sobre un espacio fijo muestral $(\Omega, F, F_t^W \mathbb{P})$. Donde el cambio del precio del activo S_t al tiempo t , es determinado por el movimiento browniano [12].

$$dS_t = \mu S_t dt + \sigma S_t dW_t \quad (13)$$

Donde

- $\mu \in \mathbb{R}$: rendimiento medio esperado.
- $\sigma > 0$: volatilidad instantánea por cada unidad de tiempo.
- dW_t : modela las fluctuaciones propias del mercado del subyacente y del MB.

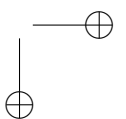
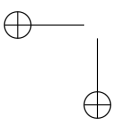
Por último, cabe destacar que el modelo de Black-Scholes asume dentro de su implementación una volatilidad constante, es decir, que para este modelo la volatilidad es estacionaria, por lo cual es importante la aplicación de un método que implemente una volatilidad estocástica en el tiempo.

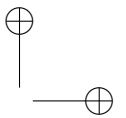
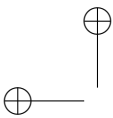
Modelo de equilibrio general de CIR

Dado que se presume que el comportamiento de las divisas latinoamericanas tienen una alta volatilidad, se hace necesaria la implementación de un modelo más robusto que describa el comportamiento de los rendimientos en el futuro; por lo cual, al asumir que una divisa tiene una volatilidad alta se define que habría que modelarla, y dentro de los procesos de difusión el modelo de Heston permite asumir una volatilidad cambiante utilizando como herramienta un modelo de media de reversión que no permite tasas negativas, también conocido como el modelo de equilibrio de CIR (Cox, Ingersoll, Ross).

El modelo de CIR [17] puede definirse como un proceso finito de números que integra procesos de aleatoriedad constantes a escala, por lo que un solo activo puede asignarse a un número finito de agentes con preferencias idénticas y que logarítmicamente se puedan seleccionar como agentes potenciales de inversión [17], por lo que el mercado tiene definición desde el momento descrito donde se invierten los recursos, el consumo tiene un nivel de solvencia por lo cual los individuos descritos invierten en activos, y el resto de su riqueza la prestan o se endeudan en un mercado ha contado con un tipo de interés de equilibrio.

Los activos siguen un comportamiento de difusión multivariante, el cual está definido por un proceso markoviano representado en un conjunto de valores de cada una de las variables, las cuales determinan la situación de la economía en el momento. Cabe resaltar que en una situación de equilibrio, todo capital que se invierte en los procesos físicos con aleatoriedad y se determina el tipo de interés con discriminación





hacia el riesgo se define mediante la metodología del modelo CIR, el cual obtiene un proceso de difusión para el tipo de interés en función [18]:

$$dr_t = \kappa(\theta - r_t)dt + \sigma\sqrt{r_t}dW_t \quad (14)$$

Donde W_t es un proceso de Wiener (modela el factor de riesgo de mercado al azar) y κ , r_t y σ son los parámetros. El parámetro κ corresponde a la velocidad de ajuste, θ para la media y σ la volatilidad. La tendencia del modelo descrita por, $\kappa(\theta - r_t)$ es exactamente la misma que se encuentra en el modelo de Vasicek. Donde se asegura la reversión a la medida de la tasa de interés hacia el valor a largo plazo θ , donde σ mide la variación de la tasa de interés alrededor de la media.

La desviación estándar del factor, $\sigma\sqrt{r_t}$, evita la posibilidad de tasas de interés negativas para todos los valores positivos de κ y μ . Una tasa de interés de cero también está impedido si la condición dada $2\kappa\theta \geq \sigma^2$.

En general, cuando la tasa (r_t) es cercana a cero la desviación estándar ($\sigma\sqrt{r_t}$) también se vuelve muy pequeña, que amortigua el efecto de choque al azar del mercado. En consecuencia, cuando la tasa se acerca a cero, su evolución se encuentra en el factor de derivación que impulsa la tasa hacia el alza (hacia el equilibrio); este proceso se encuentra definido dentro de la suma de cuadrados aplicado en el proceso de Ornstein-Uhlenbeck. El modelo CIR representa un proceso ergódico, y posee una distribución estacionaria, el mismo que se ve aplicado dentro del modelo de Heston para modelar la Volatilidad estocástica [19].

- Teniendo en cuenta los anteriores conceptos propuestos para la construcción del modelo de heston.

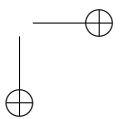
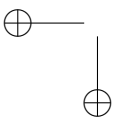
Modelo de Volatilidad Estocástica - Heston

Modelos ARCH-GARCH

Teniendo en cuenta que el comportamiento de las series temporales en las finanzas contienen características inherentes a su naturaleza, la volatilidad representa una de la más importantes de ellas, y como consecuencia, el continuo interés por tratar de predecirla. En 1982 Engle introduce la primera aproximación a los modelos autorregresivos condicionales heteroscedásticos ARCH, el cual define los procesos estocásticos como una sucesión ordenada de variables cuya distribución se encuentra definida invariantes antes calores dispersos. En general la este modelo se encuentra atado a que el supuesto más importante se encuentre dado por considerar que la información pasada de una variable observada y su volatilidad. Se describe como:

$$V_t = a_t^2 - \sigma(t)^2 = \sigma(t)^2(a_t^2 - 1) \quad (15)$$

Donde este a su vez representa un proceso de ruido blanco, el cual se encuentra conformado por variables estacionarias no correlacionadas con características muestrales como media cero y varianza marginal constante. Un proceso estacionario que sigue un proceso ARCH garantiza que la varianza es positiva y que para que dicho proceso sea estacionario, es decir, que sea independiente a su historia, se debe representar como $\sigma(t)^2$. Los modelos ARCH consiguen describir el comportamiento de la varianza condicionada y por ende describen los procesos de volatilidad presente en el comportamiento de las series temporales.



En 1986 Bollerslev desarrolló una ampliación de los modelos ARCH, esta adaptación consiste en introducir retrasos ρ de la varianza condicionada a la cual hacen referencia este tipo de modelos, se entiende entonces que los modelos GARCH actúan bajo el supuesto de normalidad con media 0 y varianza 1. Este modelo permite garantizar que la varianza sea positiva y, además de ello, que esta se encuentre condicionada al tiempo garantizando momentos de orden superior. En la aplicación del modelo de volatilidad estocástica Heston en esta investigación se aplicó el modelo ARCH-GARCH para la modelación y obtención de la volatilidad presente en las series temporales de las divisas latinoamericanas a estudiar.

Modelo Heston

Propuesto por Steven Heston [20], este modelo describe la evolución de la volatilidad de un activo subyacente donde se asume una volatilidad estocástica, es decir que la variación del activo no es persistente ni determinística, pues representa un proceso netamente aleatorio. La importancia de este modelo se sitúa en que es uno de los modelos más robustos en el ámbito financiero, ya que integra procesos de precios y un proceso para la inclusión de la volatilidad, bajo el supuesto de que su comportamiento no tiene tendencia negativa y presenta reversión a la media.

El modelo de Heston fue uno de los primeros en introducir al mercado la explicación del fenómeno de la curva sonrisa, tomado como característica principal en el modelo es la presentación de una fórmula cerrada para el precio con el supuesto de correlación entre el precio del activo la volatilidad presente, a continuación, se evidencia la dinámica estocástica que conduce a la volatilidad en el modelo .

- La dinámica estocástica que conduce a la volatilidad en el modelo de Heston supone una acción S_t , sigue un proceso estocástico de la forma [20]:

$$dS_t = \mu S_t dt + \sqrt{V_t} S_t dW_t \quad (16)$$

- $\mu \in \mathbb{R}$: representa el retorno esperado del precio del activo subyacente.
- $(W_t)_{t>0}$: movimiento browniano sobre un espacio muestral con filtración aumentada $(\Omega^w, F^w, F_t^w_{t \geq 0}, \mathbb{P}^w)$.
- σ_t : volatilidad instantánea de la presión del activo que sigue un proceso Ornstein-Uhlenbeck, por lo cual tiene un varianza V_t sigue un proceso de tipo CIR.

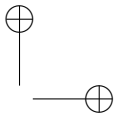
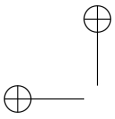
- Inclusión del proceso de cir, la varianza instantánea :

$$dv_t = \kappa(\theta - v_t)dt + \xi \sqrt{v_t} dW_t^v \quad (17)$$

- $dW_t^s dW_t^v$ son procesos de Wiener (paseos aleatorios) con ρ de correlación , o equivalente con dt covarianza ρ .

Los parámetros en cada una de las ecuaciones anteriormente representadas:

- μ es la tasa de rendimiento del activo.
- θ es el tiempo de varianza o varianza media de los precios a largo plazo, como t tiende a infinito el valor esperado de v_t tiende a θ .



- κ es la velocidad a la que las variaciones vuelven a θ .
- ε es la volatilidad de la volatilidad, es decir vol de vol y determina la varianza de v_t .

3.3. Pronóstico y evaluación

Metodología Rolling

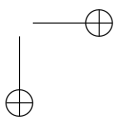
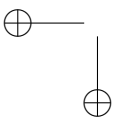
Optimizar los modelos de pronóstico cobra vital importancia desde la perspectiva de la dinámica presente en los mercados financieros y en particular en el de divisas, ya que teniendo en cuenta los enfoques de la economía global, este cobra vital importancia a la hora de hablar de expansión y crecimiento económico-financiero para los países, lo que vitaliza el supuesto volatilidad contante y estocástica y, en particular, el objetivo de optimizar los modelos que permita un mayor grado de acercamiento a la realidad que viven los mercados financieros hoy por hoy. En lineamiento con ello se aplica la metodología de Rolling Forecast, el cual es un pronóstico dinámico del comportamiento de las variables, se aplica para series periódicas donde las previsiones recogen las últimas tendencias del mercado, por lo que a medida que va incrementando la serie de datos lo últimos aportados por la misma son los que generan la tendencia y demás características presentes en las series temporales, al usar una metodología Rolling para las predicciones de divisas se puede lograr un mejor desempeño de las metodologías y, por ende, un mejor pronóstico de las variables a intervalos de tiempo futuro.

Estadístico de error

Bajo criterios estadísticos, los errores de la estimación surgen en la estimación de calores a interés y se encuentran sujetas a la diferencia presente entre una muestra y otra. En relación con ello, los estadísticos de error pueden ser expresados como términos de valoración que permitan dar una conclusión acerca de si el error muestral es deseado y controlado. En este orden de ideas, se tiene en cuenta el error cuadrático medio como factor de evolución entre las dos metodologías de pronóstico propuestas, en la cual se mide el promedio de errores al cuadrado estimados bajo cada uno de los modelos. El RMSE es una función de riesgo, la cual permite calcular cuál es la máxima pérdida cuadrática producidas por la aleatoriedad. Este estimador permite tener en encuentra la varianza de la estimación y el sesgo recogido en esta valoración, es por ello que se toma como una medida de selección entre modelos que puedan pronosticar mejor, desde la perspectiva de insesgamiento y de mínimo error.

Test Diebold-Mariano:

El test de Diebold y Mariano [21] es un test predictivo que intenta determinar de manera comparativa cuál de los dos modelos de pronósticos planteados genera mejores resultados poblacionalmente. Esta comparación se hace bajo los errores de los modelos como se expuso anteriormente. Fue propuesto en 1995 para las aplicaciones empíricas, donde se pronostican una o más series de tiempo de las variables de interés; a partir de lo anterior, se formula la pregunta ¿cuál de los modelos pronostica mejor?, de ahí el desarrollo de esta prueba que brinda una solución a este interrogante. En conclusión dependiendo del grado de correlación serial entre los errores de pronóstico y el tamaño de la muestra T se seleccionará el mejor pronóstico de adaptación. Para la obtención de este (Diebold y Mariano, 1995):



$$DM = \frac{\bar{d}}{\sqrt{\text{var}(\bar{d})}} \sim N(0, 1) \quad (18)$$

$$DM = \frac{\bar{d}}{\sqrt{\text{var}(\bar{d})}} \sim t(N-1) \quad (19)$$

Para saber si un modelo es mejor que otro se realiza la siguiente hipótesis nula en donde se sugiere que los dos modelos propuestos tienen igual alcance de predicción.

$$H_0 : E[L(E_t + h|t)^A] = E[L(E_t + h|t)^B] \quad (20)$$

Y, por último, se propone la hipótesis alterna, algún modelo es mejor que el otro en alcance de predicción.

$$H_1 : E[L(E_t + h|t)^A] \neq E[L(E_t + h|t)^B] \quad (21)$$

4. Metodología

Existen muchos elementos que se pueden abordar y desarrollar en la investigación sobre temas relacionados con el pronóstico de activos financieros. Esta investigación se inicia con la recolección de suficiente información de cada una de las cotizaciones de las paridades de estudio, realiza la evaluación de volatilidad variable y aplica los modelos de Black-Scholes y Heston; finalmente, los resultados también son evaluados, todo esto con el fin de generar un mejor pronóstico, muy próximo a la realidad. A continuación se presenta de manera general, la metodología realizada en esta investigación.

Se aplica la metodología de Black-Scholes y la metodología de Heston a uno y a veintidós días, teniendo en cuenta periodos de predicción a un corto y mediano-largo plazo, la estimación de parámetros se realiza a partir del histórico para el modelo de Black-Scholes, por su parte para el modelo de Heston se estima la volatilidad bajo la aplicación de modelos ARCH-GARCH y para la correlación se utiliza la estadística de descomposición propuesta por Cholesky; es importante tener en cuenta que la estimación de parámetros para cada uno de los modelos es de manera independiente. El pronóstico se realizó mediante la aplicación de la Simulación de Montecarlo bajo el pronóstico dinámico, también llamado Rolling, con horizontes de tiempo a uno y a veintidós días. Por último la evaluación se realiza mediante análisis gráfico, estadística de error y la aplicación del test de Diebold y Mariano, que permite comparar las dos metodologías a corto y a mediano plazo lo anterior permite evaluar si los supuestos clásicos que frecuentemente analizan para modelar estas variables se cumplen empíricamente en función de la precisión de los pronósticos (Figura 1).

4.1. Descripción de la información

En la selección de las divisas aplicables para esta investigación, se tuvieron en cuenta las que representan mayor importancia en el entorno latinoamericano y, además de ello en las que se generan mayores fluctuaciones en sus cotizaciones del mercado de divisas, estas son el insumo para la obtención de los pronósticos comportamentales en un horizonte de tiempo a uno y veintidós días. Teniendo en cuenta el insesgamiento presente en la obtención de dichos pronósticos, toma mayor relevancia la selección del

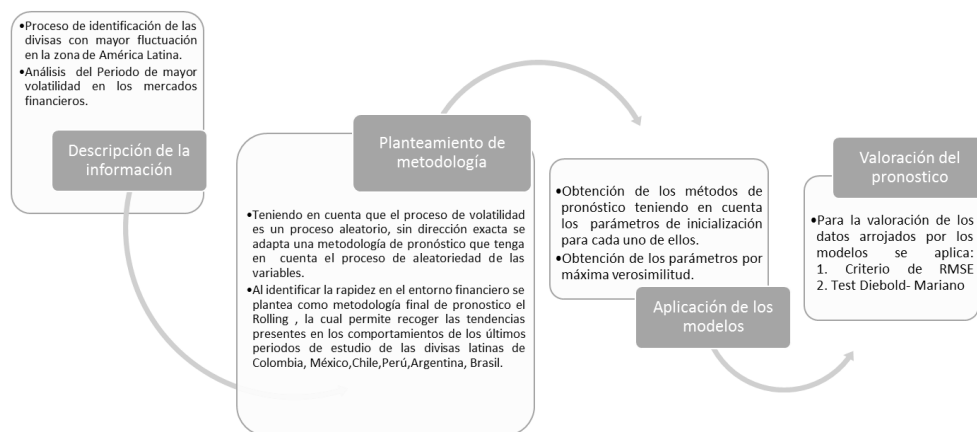


Figura 1: Etapas Metodológicas

método que mejor se adecúe a los factores poblacionales incidentes sobre cada activo, para posteriormente evaluar las características de los pronósticos y la obtención del mejor para cada paridad.

Para la selección de la información en primera instancia se realizó un análisis del comportamiento de las variables , incluyendo todas las divisas presentes en el mercado latino. En relación con ese análisis se seleccionaron las que presentaban mayor fluctuación frente al dólar, por lo que su pronóstico es más difícil de realizar.

De lo anterior que la metodología de esta investigación tiene como punto de partida la obtención de la cotización en un periodo comprendido 19-03-2014/20-03-2017 datos diarios , de cada una de las diferentes paridades como la colombiana, mexicana, brasilera, argentina, peruana y chilena todas atadas al dólar estadounidense de las cuales se obtuvieron los rendimientos diarios de cada activo, los cuales proporcionan el insumo principal para de desarrollo de los modelos de Black-Scholes y Heston. Fuente de información Bloomberg.

4.2. Propuesta metodológica

La optimización los modelos de pronóstico tiene vital importancia desde la perspectiva de la dinámica presente en los mercados financieros y, en particular, en el de divisas, ya que teniendo en cuenta los enfoques de la economía global este tiene total validez a la hora de hablar de expansión y crecimiento económico-financiero para los países lo que vitaliza el supuesto volatilidad constante y estocástica y en particular el objetivo de optimizar los modelos que permita un mayor grado de acercamiento a la realidad que viven los mercados financieros hoy por hoy. En lineamiento con ello se aplica a la metodología de Rolling Forecast el cual es un pronóstico dinámico del comportamiento de las variables, el cual se aplica para series periódicas donde las previsiones recogen las últimas tendencias del mercado, por lo que a medida que va incrementando la serie de datos lo últimos aportados por la misma, son los que generan la tendencia y demás características presentes en las series temporales, al usar una metodología Rolling para las predicciones de divisas se puede lograr un mejor desempeño de las metodologías y, por ende, un mejor pronóstico de las variables a intervalos de tiempo futuro.

Para la aplicación y obtención de los pronósticos para cada uno de los modelos se procedió aplicar una metodología Rolling, la cual consiste en ir ingresando un dato adicional a la serie e ir pronosticando; de esta manera, de los nuevos datos ingresados a la serie tienen mayor importancia, pues tienen en cuenta la tendencia del mercado y por ende se tiene la facilidad de responder más rápidamente a los choques inherentes frente al mismo. En este caso diez pronósticos futuros por cada observación añadida a la muestra. Es decir que para estos modelos genera un pronóstico máximo de ($h_{max} = 21$), teniendo en cuenta los parámetros de estimación para la muestra anteriormente definidos. El proceso se repite con los parámetros reestimados utilizando como conjunto de información ($I_{(t+1)}$), en donde la muestra inicial (I_t) de estimación y se adiciona la siguiente observación como se evidencia en la Figura 2. *A posteriori* se procede a hacer la evaluación del pronóstico.

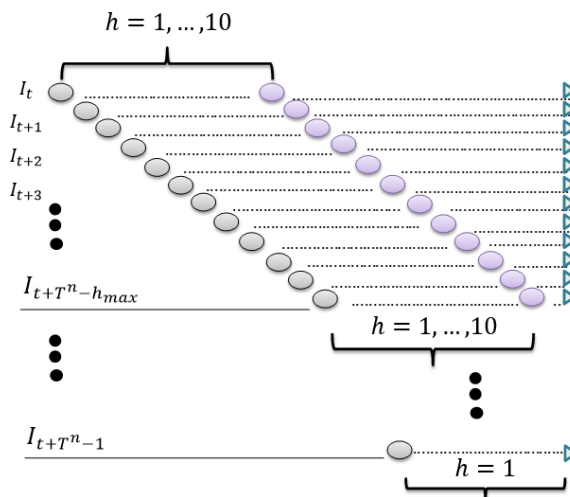


Figura 2: Metodología para pronóstico

4.2.1. Obtención de los métodos

Teniendo en cuenta la constante aplicación de los principales agentes interesados en pronosticar el comportamiento futuro de las divisas y, para este caso, las divisas latinoamericanas, se plantean las variables de entrada del modelo clásico aportado por Black-Scholes anteriormente expuesto y en relación con ello se aplica el modelo de Heston debilitando el principal supuesto de volatilidad constante que aportan los modelos clásicos lineales, esto con el fin de determinar si a través del tiempo se cumplen supuestos de adaptación de la serie teniendo en cuenta un contexto netamente determinístico. Por lo anterior, que se tengan en cuenta los siguientes parámetros de entrada desarrollados para cada uno de los modelos dentro del lenguaje de programación aportado por el *software* Matlab.

- Modelo Black-Scholes: como se identificó en la presentación del marco teórico para la obtención de este modelo se tiene en cuenta los parámetros: μ, σ, dW_t
- En otras palabras se calcula la media de los retornos, y la variación de los mismos, posteriormente

se asigna a cada parámetro que compone el modelo de BS (número de simulaciones, horizonte de tiempo, media de la varianza los retornos, varianza de los retornos y precio inicial) para la aplicación de n iteraciones con pronóstico a uno y veintiún días .Luego de obtener el modelo BS se calcula su RMSE para uno de los horizontes de pronósticos que se aplicaron en el modelo.

- Modelo Heston: para la aplicación de este modelo se tienen en cuenta los parámetros¹: μ, θ, κ y ε , como se describió anteriormente.

Como se puede identificar en los parámetro que componen el modelo de Heston, aunque ninguno es igual a los expuestos en el modelo de Black-Sholes-Merton, su identificación y afinación al diferir de un solo parámetro en donde se contradice el primer supuesto del modelo de BSM de que el comportamiento de la volatilidad es estable , pues para este modelo ε corresponde a la variable presente en los precios que es la volatilidad de la volatilidad, y se asume como principal supuesta que hay una volatilidad explícita en el comportamiento de los precios; por lo anterior, el proceso de obtención de los parámetros para este modelo difiera en la primera parte , pues primero se debe hacer la obtención de la medida de volatilidad en el comportamiento de las series temporales para luego aplicar e identificar los siguientes parámetros como se detalla a continuación:

- En primera instancia teniendo en cuenta la serie de los retornos y se procede a la obtención de la serie de la volatilidad de los mismo aplicando la metodología una metodología ARCH (Tabla I).

Tabla I: Obtención volatilidad

Variable	Coefficient	Std. Error	z-Statistic	Prob.
C	0.000384	0.000365	1.053776	0.2920
Variance Equation				
C	4.62E-06	1.17E-06	3.956894	0.0001
RESID(-1) ²	0.071406	0.016237	4.397777	0.0000
GARCH(-1)	0.886830	0.024651	35.97594	0.0000
R-squared	-0.000099	Mean dependent var		0.000486
Adjusted R-squared	-0.000099	S.D. dependent var		0.010254
S.E. of regression	0.010254	Akaike info criterion		-6.390764
Sum squared resid	0.078020	Schwarz criterion		-6.365942
Log likelihood	2378.169	Hannan-Quinn criter.		-6.381196
Durbin-Watson stat	1.878831			

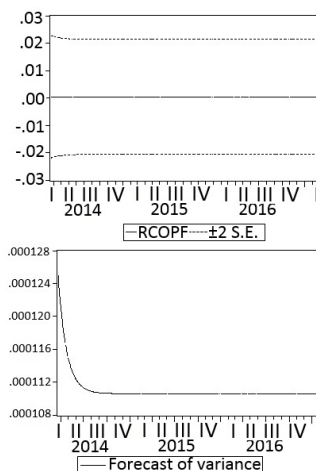


Figura 3: Comportamiento volatilidad

Con respecto a la Figura 3, donde se aplica el proceso ML-ARCH para la variable COP, se evidencia que el correlograma asociado a los residuos y los errores al cuadrado no representan significancia, por lo que los residuos siguen un comportamiento de normalidad y homocedasticidad.

¹La correlación se utiliza la estadística de descomposición propuesta por Cholesky, es importante tener en cuenta que la estimación de parámetros para cada uno de los modelos es de manera independiente

tividad, por lo cual el comportamiento de las variables no guarda correlación estadística con su historia, es decir, la variable siempre tomará un valor distinto sin afectar su varianza.

Con el modelo anteriormente propuesto, y teniendo en cuenta las variables expuestas, se define que es viable realizar la predicción teniendo en cuenta los intervalos de confianza en los que estarían oscilando los valores de predicción, aplicando de manera precisa la varianza de error que se ha aplicado en manera de estimación. El anterior proceso fue aplicado para las seis divisas tenidas en cuenta en esta investigación metodológica.

- Aplicación del modelo inmerso en el modelo de Heston (equilibrio de CIR) en donde partir de la serie de la volatilidad de los retornos se estiman sus tres parámetros *alpha* (media de reversión), *nu* (media θ), *sigma* (volatilidad de la volatilidad) y *rho* (correlación varianza-rendimiento).
- Por último, se aplica en totalidad el modelo de Heston teniendo los parámetros anteriormente obtenidos y asumiendo una volatilidad estocástica para cada una de las variables (media de la varianza de los retornos, numero de simulaciones, horizonte de tiempo, volatilidad estocástica, precio inicial, correlación varianza, rendimiento, media de reversión, media θ , volatilidad de la volatilidad). Teniendo en cuenta que para la aplicación de este se tiene el mismo horizonte de tiempo en el pronóstico de sus iteraciones y por ultimo calcula RMSE.

A continuación se hace la aplicación de pruebas de normalidad e independencia dentro de cada una de las series para las divisas de los países de Colombia, Brasil, Chile, México, Perú y Argentina. Teniendo en cuenta supuestos de Heterosedasticidad en las series, invertibilidad y pruebas de bondad.

Análisis gráfico, de la serie corta con frecuencia hacia su media y variabilidad persistente, lo cual indica que la serie puede ser aleatoria, por lo cual tiene sentido tener en cuenta una volatilidad aleatoria y el planteamiento de modelos que modelen la volatilidad de manera aleatoria (Figura 4).

El aspecto de la FAC y FACP corresponde a las pruebas para garantizar que la serie sea o no una serie estacionaria. En este caso se observa el decaimiento no truncado en algunas partes de cada correlograma, por lo que se puede ver una fase de identificación de perdida para proponer el modelo autorregresivo y, posteriormente, aplicar el modelo a la estimación y comprobación de volatilidad de las series (Tabla II).

Validación de los modelos de estimación que describen el comportamiento de la serie donde se evidencia el análisis de residuos, coeficientes y la bondad de ajuste presente en las series temporales; de esta manera, se comprueba que los residuos de los modelos de estimación tienen comportamientos de compatibilidad con ruido blanco, por lo cual tiene total validez el pronóstico de las series teniendo en cuenta independencia en las mismas (Tabla III).

Teniendo en cuenta cada una de las series, se aplica el test de heterosedasticidad para confirmar que las perturbaciones presentes en las series temporales no sean constantes a lo largo del tiempo, como se evidencia en la Tabla IV. En este caso se confirma el supuesto y eso permite considerar como un modelo de predicción heterosedástico de varianza del error condicional de las variables explicativas variable a lo largo del tiempo.

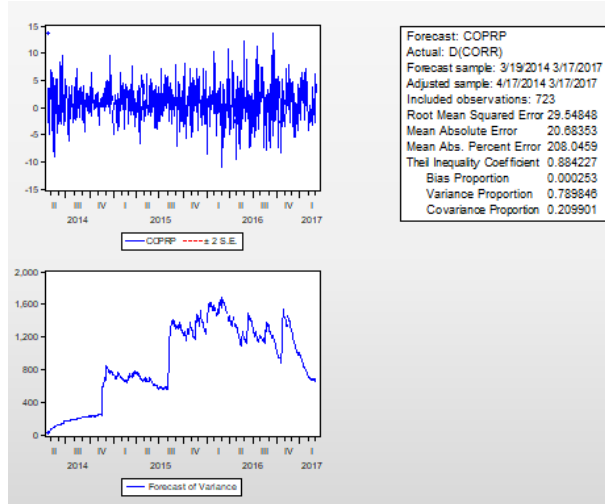


Figura 4: Verificación de supuestos

Tabla II: Verificación de supuestos

Date: 05/16/17 Time: 15:44
Sample: 1744
Included observations: 743

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob
1	0.058	0.058	2.5321	0.112	
2	-0.050	-0.053	4.3883	0.111	
3	0.003	0.009	4.3845	0.222	
4	-0.004	-0.008	4.4084	0.354	
5	-0.002	-0.000	4.4106	0.482	
6	0.041	0.040	5.6468	0.484	
7	0.000	-0.005	5.6469	0.582	
8	-0.042	-0.038	6.9567	0.541	
9	0.013	0.017	7.0796	0.629	
10	-0.019	-0.025	7.3884	0.691	
11	-0.024	-0.019	7.8013	0.731	
12	0.003	0.002	7.8092	0.800	
13	0.036	0.034	8.8157	0.787	
14	-0.002	-0.003	8.8189	0.842	
15	0.035	0.038	9.7540	0.835	
16	0.074	0.070	13.921	0.605	
17	-0.002	-0.004	13.924	0.673	
18	-0.039	-0.035	15.099	0.555	
19	0.038	0.038	16.178	0.645	
20	0.082	0.076	21.306	0.379	
21	-0.004	-0.011	21.321	0.440	
22	0.006	0.007	21.349	0.499	
23	-0.033	-0.030	22.173	0.510	
24	-0.004	0.010	22.187	0.568	
25	-0.004	-0.012	22.202	0.624	
26	0.036	0.033	23.184	0.623	
27	-0.000	0.002	23.184	0.675	
28	-0.060	-0.059	25.990	0.574	
29	-0.022	-0.021	26.362	0.606	
30	-0.022	-0.020	26.750	0.636	
31	-0.039	-0.041	27.912	0.626	
32	-0.009	-0.017	27.974	0.671	

Por lo anterior se puede considerar que las pruebas de inclusión de normalidad de las series temporales se adaptaron de acuerdo con los supuestos de volatilidad aleatoria bajo el supuesto del comportamiento de cada una de las variables de descripción.

Tabla III: Verificación de supuestos

Dependent Variable: D(CORR)
Method: ML - ARCH
Date: 05/16/17 Time: 15:10
Sample (adjusted): 4/17/2014 3/03/2017
Included observations: 723 after adjustments
Convergence achieved after 186 iterations
MA Backcast: 3/20/2014 4/16/2014
Presample variance: backcast (parameter = 0.7)
GARCH = C(4) + C(5)*RESID(-1)^2 + C(6)*GARCH(-1)

Variable	Coefficient	Std. Error	z-Statistic	Prob.
C	0.902246	0.921044	0.979590	0.3273
AR(20)	-0.781293	0.054357	-14.37345	0.0000
MA(20)	0.852044	0.041317	20.62205	0.0000

Variance Equation

Variable	Coefficient	Std. Error	z-Statistic	Prob.
C	3.853944	0.586961	6.565930	0.0000
RESID(-1)^2	0.020384	0.003681	5.538395	0.0000
GARCH(-1)	0.976629	0.004065	240.2241	0.0000

R-squared	0.014527	Mean dependent var	1.376279
Adjusted R-squared	0.011790	S.D. dependent var	29.78609
S.E. of regression	29.60998	Akaike info criterion	9.395197
Sum squared resid	631260.6	Schwarz criterion	9.433234
Log likelihood	-3390.364	Hannan-Quinn criter.	9.409879
Durbin-Watson stat	1.901142		

Inverted AR Roots

.98-.15i	.98+.15i	.88+.45i	.88-.45i
.70-.70i	.70+.70i	.45-.98i	.45+.98i
.15-.98i	.15+.98i	-.15-.98i	-.15+.98i
-.45-.88i	-.45+.88i	-.70-.70i	-.70+.70i
-.88-.45i	-.88+.45i	-.98+.15i	-.98-.15i

Inverted MA Roots

.98-.16i	.98+.16i	.88+.45i	.88-.45i
.70-.70i	.70+.70i	.45-.88i	.45+.88i
.16-.98i	.16+.98i	-.16-.98i	-.16+.98i
-.45-.88i	-.45+.88i	-.70-.70i	-.70+.70i
-.88-.45i	-.88+.45i	-.98+.16i	-.98-.16i

Tabla IV: Verificación de supuestos

Heteroskedasticity Test: ARCH

F-statistic	3.138196	Prob. F(8,726)	0.0017
Obs*R-squared	24.56724	Prob. Chi-Square(8)	0.0018

Test Equation:
Dependent Variable: RESID^2
Method: Least Squares
Date: 05/16/17 Time: 15:46
Sample (adjusted): 10 744
Included observations: 735 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	6.89E-05	1.22E-05	5.651815	0.0000
RESID^2(-1)	0.051970	0.037112	1.400358	0.1618
RESID^2(-2)	0.080976	0.037175	2.447205	0.0146
RESID^2(-3)	0.098112	0.037324	2.628636	0.0088
RESID^2(-4)	0.006773	0.037431	0.180947	0.8565
RESID^2(-5)	0.062380	0.037433	1.666441	0.0961
RESID^2(-6)	0.006749	0.037327	0.180809	0.8566
RESID^2(-7)	0.016685	0.037172	0.448858	0.6537
RESID^2(-8)	0.013510	0.037100	0.364159	0.7158

R-squared	0.033425	Mean dependent var	0.000105
Adjusted R-squared	0.022774	S.D. dependent var	0.000237
S.E. of regression	0.000234	Akaike info criterion	-13.86872
Sum squared resid	3.98E-05	Schwarz criterion	-13.81239
Log likelihood	5105.754	Hannan-Quinn criter.	-13.84699
F-statistic	3.138196	Durbin-Watson stat	1.999755
Prob(F-statistic)	0.001692		

5. Resultados empíricos

Los resultados arrojados por los dos modelos de evaluación, se encuentran incluidos en el intervalo de comprendido del 19-03-2014/ 21-03 2017 para el pronóstico individual y del 19-03-2014/18-04-2017 para los dos métodos en combinación al pronóstico de veintidós días. En ambos casos, se utilizaron los datos en la misma periodicidad y se realiza la estimación de las paridades y los periodos adicionales para la divisa colombiana. Los resultados finales de los métodos de predicción son representados en las tablas según espacio de tiempo y se muestran los diferentes estadísticos de RMSE para la evaluación de los pronósticos en los dos horizontes considerados para las paridades de cada país, por último se evaluaron las dos medidas de las muestras por medio de los siguientes criterios.

Eficiencia del modelo propuesto frente a modelos clásicos de un solo factor(Black-Scholes), a través del test de Diebold-Mariano

- RMSE: el error cuadrático medido anteriormente y obtenido en cada uno de los modelos y en cada uno de las iteraciones evaluadas, constituye un estimado para el desempeño de los modelos.
- Test Diebold-Mariano: se evalúan los errores a un día, determinando la diferencia del valor pronosticado con el modelo (BS-Heston) y el precio de cierre real, se tuvo en cuenta el error que da como resultado en el paso anterior se eleva al cuadrado. Por último la aplicación para el test a veintidós días varía en que se toma la serie de datos obtenida por los dos modelos (BS-Heston), la serie inicial de los precios de cierre. El error que da como resultado en el paso anterior se eleva al cuadrado.

5.1. Análisis de resultados

En la Figura 5, se observa el comportamiento en el periodo de tiempo de estudio de la divisa colombiana atendiendo las inconsistencias de los mercados y, además de ello, al porcentaje de retorno asociado a la paridad USD-COP.

Aplicando la metodología expuesta en esta investigación a un horizonte de tiempo de un día se evidencia que:

- El modelo de Black-Scholes-Merton a un día se demuestra en la primera parte de la Figura 6, por lo cual se identifica el desfase entre el comportamiento del precio real y la metodología aplicada para el pronóstico, lo que quiere decir que, aunque la brecha entre este modelo y la realidad es pequeña, demuestra que existen diferencias con respecto al comportamiento en el mercado real, a diferencia de la segunda parte de la Figura 6, donde el comportamiento del precio real, en contraste con la metodología del modelo de Heston donde a simple vista no se logra identificar brecha alguna, lo que nos da una perspectiva de que el modelo que mejor se adapta a los parámetros iniciales requeridos por el activo es el modelo de Heston, se asume una volatilidad estocástica.
- Considerando el comportamiento del mercado financiero asociado se identifica en la primera parte los posibles escenarios en que puede converger el precio de la divisa colombiana durante un periodo n de tiempo bajo una metodología estocástica. Por último, se puede identificar que para la aplicación bajo una ventana de tiempo de mediano plazo ($h=21$) se identifica que analizar el comportamiento de las variables es mucho más complejo pues, la brecha entre el precio en que

oscila la variable en su realidad con el de las dos metodologías propuestas solo se puede identificar mediante la aplicación de estadísticos de error que permitan la distinción y la valoración del mejor método, ya que a simple vista se podría deducir que es indiferente cuál de las dos metodologías se aplique para el pronóstico a $h=21$ días.

Para las cinco variables de divisas restantes (Brasil, Chile, Argentina, México y Perú) se hizo el mismo proceso de análisis anteriormente evidenciado.

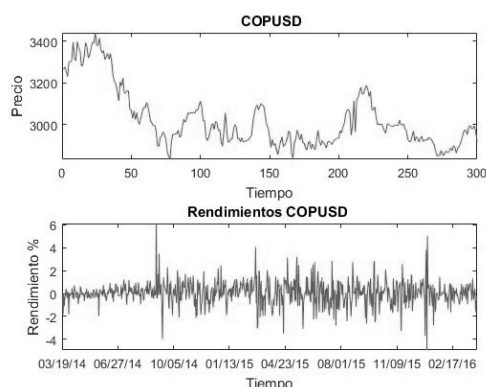


Figura 5: Precio-Rentabilidad

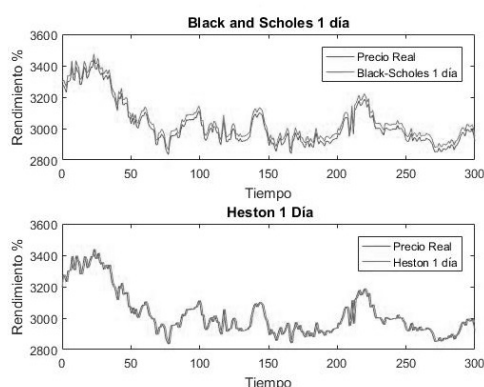


Figura 6: Modelos COP $h=1$

5.2. Evaluación de pronóstico

Analizando el pronóstico con horizonte de tiempo a un día, se identifica que el alcance del modelo de Heston que tiene mejor predicción a un día de manera ascendente son: Perú, México, Argentina, Chile, Brasil y Colombia. Analizando el pronóstico con horizonte de tiempo a veintiún días, y teniendo en cuenta los choques inherentes que se presentan en la naturaleza de los mercados en una ventana de tiempo más amplia, el alcance de los modelos es más variable de esta forma se identifica que:

- Para el modelo de Black-Scholes-Merton, el asumir una volatilidad constante a una condición de tiempo más amplia genera un mejor pronóstico para las divisas de México, Argentina y Colombia.
- Para el modelo de Heston se concluye que para una ventana de tiempo de mediano plazo y teniendo en cuenta los choques de las economías expuestas es mejor asumir una volatilidad estocástica para los países de Perú, Chile y Brasil.

Evaluación a un día con RMSE

En las previsiones a un día se aplican los modelos BS y Heston, donde el estimador mide el promedio de los errores al cuadrado, es decir, la diferencia entre el estimador y lo que se estima. De lo cual en esta primera parte se puede evidenciar el RMSE de los modelos para cada una de las divisas como se muestra en la Tabla V.

- Cabe anotar que el RMSE también es un factor de evaluación de efectividad de los modelos de predicción a un día para este caso.

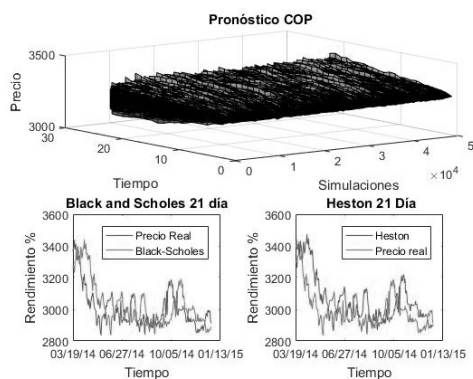


Figura 7: Precio-rentabilidad

Tabla V: RMSE

PAÍS	RMSE	
	BS	HESTON
Colombia	2,18E+03	0,01712
México	0,0221	1,73E-04
Brasil	0,0028	1,05E-06
Argentina	3,03E-05	1,63E-05
Perú	9,29E-05	6,02E-07
Chile	0,0015	1,17E-06

- De donde para la previsión a un día se encuentra la Tabla V, donde se considera la muestra completa final del mejor modelo para un horizonte de 1. Teniendo en cuenta el RMSE se entiende además como una función de riesgo, correspondiente a la estimación del valor esperado de la pérdida del error al cuadrado o pérdida cuadrática. Por lo anterior, se quiere que el RMSE sea lo más pequeño posible. De lo anterior se concluye que: para cada uno de los modelos individuales (por paridad de divisa) el mejor modelo de estimación a corto plazo es Heston, Argentina: Heston, Perú: Heston, Chile: Heston. Por lo cual se puede evidenciar que para la evaluación de modelos de pronóstico a un día con RMSE el modelo que brinda mejor resultado teniendo en cuenta sus errores es el modelo de Heston.

Tabla VI: Test-DM

h=1	DM
PAÍS	
Colombia	3,53***
México	64,0***
Brasil	3,67***
Argentina	56,63***
Perú	92,44***
Chile	48,81***
Significancia 1% (***)	

Tabla VII: RMSE

PAÍS	RMSE	
	BS	HESTON
Colombia	1,51E+04	1,85E+04
México	0,661	0,0604
Brasil	0,0216	2,71E-02
Argentina	0,667	6,29E-01
Perú	0,0014	9,15E-04
Chile	0.0216	0,0271

Por otro lado encontramos la evaluación del pronóstico a través test Diebold y Mariano Se basa en los errores de cada uno de los modelos teniendo en cuenta que el modelo de Heston incluye la estimación de la volatilidad por medio de un ARCH.

- Teniendo en cuenta la información aportada en la Tabla VI, se evidencia que el P-value para esta prueba es cero, por lo cual lo cual indica que Heston fue muy superior en términos de predicción

diaria para todas las paridades de divisas frente al comportamiento predictivo que tuvo Black-Scholes por lo cual rechazó H_0 y el mejor modelo de pronóstico es el aportado por Heston.

Tabla VIII: Test-DM

h=21	DM
PAÍS	
Colombia	-3,35
México	-3,54
Brasil	5,75***
Argentina	-3,51
Perú	7,47***
Chile	5,75***
Significancia 1% (***)	

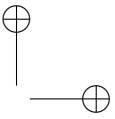
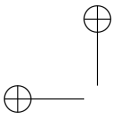
Evaluación a un día con RMSE veintiún días

En efecto el RMSE para este horizonte de tiempo tiene la misma interpretación en función de riesgo y, además, en valor esperado para los dos modelos, por lo cual para una previsión a veintiún días y teniendo en cuenta la aplicación de la volatilidad empírica del modelo de Heston se puede evidenciar en la Tabla VII se tiene que:

- El modelo de Black-Scholes demuestra menores errores en su predicción y una función de riesgo menos alta para las divisas de Colombia y Brasil, por lo que este brinda un mejor cálculo en su predicción en un horizonte de tiempo a veintiún días.
- Para el modelo de Heston se identifica que los RMSE más pequeños obtenidos por el modelo en comparación con BS y por tanto con los que obtiene un nivel de riesgo menor y una estimación más precisas se aplica en un horizonte de veintiún días para México, Argentina, Perú y Chile véase (Tabla VII).

Ahora bien, teniendo en cuenta la información consignada en la Tabla VIII donde se tiene en cuenta el valor del test y con respecto a este se estima e valor del P-value se evidencia que a partir de los estimados se entiende que:

- A pesar de los errores del RMSE para la divisa colombiana, mexicana, argentina se evidencia que es indiferente el pronosticar con un modelo de Black-Scholes o Heston según el P-value arrojado por el valor del test de diferenciación, se acepta H_0 para las divisas anteriormente mencionadas. De igual forma, teniendo en cuenta el valor del test, se demuestra que demás de las diferencias de RMSE el modelo de Heston proporciona una mayor precisión al mediano plazo con respecto a modelo de Black-Scholes para las paridades de Brasil, Perú y Chile, teniendo en cuenta que la hipótesis nula se define bajo la perspectiva de igualdad de predicción para los dos modelos y en ese orden de ideas se rechaza la hipótesis nula y el mejor modelo de pronóstico sigue siendo el aportado por Heston, para los otros casos el mejor es el de BS.



6. Conclusiones

La presente investigación se ha enfocado al análisis de los patrones temporales intrínsecos asociado con sus procesos estocásticos generadores de volatilidad presentes en los mercados de divisas asociados a América Latina para seis países específicos, mediante la aplicación de metodologías que validen supuestos de volatilidad constante en estos mercados.

En la evaluación de pronósticos en Rolling para los modelos de Black-Scholes y Heston demuestra que a corto plazo el método que mejor se adapta a las estimaciones de las variables es modelo de Heston, ya que se incluye la volatilidad aleatoria y esta recoge todos los efectos presentes en el corto plazo. En el mediano plazo el modelo más preciso varía, ya que no está afectando en gran medida la volatilidad que mide las variaciones presentes en el mismo periodo de tiempo.

Por lo cual se debe tener en cuenta que para un mediano-largo plazo tiene más sentido manejar una volatilidad no condicional sino constante, para algunos países, es decir, una volatilidad incondicional, pero en el corto hay que reconocer las variaciones condicionales al tiempo.

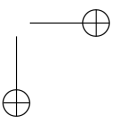
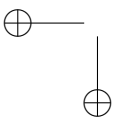
Al modelar la volatilidad condicionada de los rendimientos de las divisas latinoamericanas, se identifica un mejor ajuste en el modelo del pronóstico de Heston para el corto plazo, por lo que se podría inferir que este modelo tiene relevancia en las decisiones de corto plazo para la totalidad de las divisas a las cuales se aplicó, de lo anterior que a un mediano plazo su efectividad no se aplique en igual proporción a todas las divisas. Al verificar con la pruebas de ARCH LM se verificó que existía dentro de los datos una estructura de autocorrelación en la volatilidad, lo cual permitió reconocer que la varianza se encuentra condicionada y la volatilidad no es constante, por lo que la alternativa de Heston cobra vida dentro de la estimación a futuro de las divisas latinoamericanas.

7. Agradecimientos

En memoria del ser que toco mi vida y mi alma, Aura María Hernández quien me enseñó el valor de la vida y la responsabilidad que viene inmersa en ella. A mis directores de tesis, Miller Ariza, Andrés Martínez y Gloria Bohórquez, quienes fueron orientación teórica- Práctica en el desarrollo de esta investigación.

Referencias

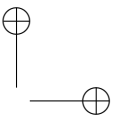
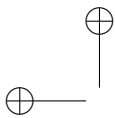
- [1] Zhi-Min Ling, Thao Vo, Siu-May Ho, Ying Shiao, Yeng-Kaung Peng, Yung-Tao Lin, "Real-time in-line defect disposition and yield forecasting system" *US 5598341 A* 28 de enero 1997. ↑ 167
- [2] J.J. Echavarría, D. M. Vásquez y M. Villamizar, "Impacto de las intervenciones cambiarias sobre el nivel y la volatilidad de la tasa de cambio en Colombia" *Revista Borradores de Economía*, vol. 561, no. 1, 2009, pp. 12-69. ↑ 168
- [3] J. A. Avellaneda, C. M. Ochoa y J. C. Figueroa, "Comparación entre un sistema neuro difuso auto organizado y un modelo arimax en la predicción de series económicas volátiles" *Revista Universidad Distrital*, vol. 17, no. 2, 2012. ↑ 168
- [4] G. Rodríguez, "Modeling Latin-American stock markets volatility: Varying probabilities and mean reversion in a random level shift model." *Magazine Review of Development Finance*, vol. 6, no. 1, 2016, pp. 26-45. ↑ 168
- [5] C. I. Patiño y J. C. Alonso, "Evaluación de pronósticos para la tasa de cambio en Colombia" *Revista Universidad Icesi Colombia*, Vol. 96, No. 1, 2005, pp. 13-29. ↑ 169



- [6] E. F. Firacative, “Aplicación del modelo CAPM para la valoración de acciones en el mercado integrado latinoamericano MIL.” *Tesis Maestría, Universidad Nacional, Bogotá, 2015.* ↑ 169
- [7] E. Cartagena, “METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL DRIFT DE LA TASA DE CAMBIO (USD/COP) A TRAVÉS DE MODELOS BAYESIANOS.” *Revista en contexto*, vol. 1, no. 7, 2017, pp. 36-45. ↑ 169
- [8] F. Villada, W. Muñoz y M. Henao, “Pronóstico de las tasas de cambio. una aplicación al yen japonés mediante redes neuronales artificiales” *La Revista Scientia et Technica*, vol. 1, no. 30, 2006, pp. 233-238. ↑ 169
- [9] G. Benavides y C. Capistran, “Pronóstico de la Volatilidad del Tipo de Cambio: el Desempeño Superior de Combinaciones Condicionales de Pronósticos de Series de Tiempo y Pronósticos Implícitos en Opciones” *Revista Banco de Mexico*, vol. 1, no. 1, 2009, pp. 9-28. ↑ 169
- [10] A. Ortiz, F. Venegas y M. D. Bustamante, “Valuación de opciones europeas sobre amx-l, walmex-v y gmexico-b” *Revista El Trimestre Económico*, vol. 4, no. 324, 2014, pp. 943-988. ↑ 169
- [11] F. C. Klebaner, *Introduction to Stochastic Calculus with Applications*, Singapore: Imperial College Press, 2012. ↑ 170
- [12] S. Shreve, *Stochastic Calculus for Finance II: Continuous-Time Models*, New York: Springer-Verlag, 2004. ↑ 171, 172, 174
- [13] R. G. Brown, *Smoothing, Forecasting and Prediction of Discrete Time Series (Dover Phoenix Editions)*.Dover Publications, 2004. ↑
- [14] R. C. Merton, “Theory of Rational Option Pricing The Bell Journal of Economics and Management Science” *La Revista RAND Corporation*, Vol. 4, no. 1, 1973, pp. 141-183. ↑ 171
- [15] F. Black y M. Scholes, “The Pricing of Options and Corporate Liabilities” *The Journal of Political Economy*, vol. 81, No. 3, 1973, pp. 637-654. ↑ 173
- [16] A. C. Harvey and N.G. Shephard, “Estimation and Testing of Stochastic Variance Models” *Revista Suntory and Toyota International Centres for Economics and Related Disciplines*, vol. 4, no. 268, 1993, pp. 232-345. ↑ 173
- [17] J. C. Cox, J. E. Ingersoll and S. A. Ross, “A Theory of the Term Structure of Interest Rates” *Revista Econometric Society*, vol. 53, no. 2, 1985, pp. 385-407. ↑ 174
- [18] D. Heath, R. Jarrow y A. Morton, “Bond Pricing and the Term Structure of Interest Rates: A New Methodology for Contingent Claims Valuation” *Revista Econometric Society*, vol. 60, no. 1, 1992, pp. 77-105. ↑ 175
- [19] L. Bergomi, *Stochastic Volatility Modeling*, New York: Chapman and Hall/CRC, 2015. ↑ 175
- [20] S. L. Heston, “A Closed-Form Solution for Options with Stochastic Volatility with Applications to Bond and Currency Options” *Revista The Review of Financial Studies*, vol. 6, no. 2, 1993, pp. 327-343. ↑ 176
- [21] F. X. Diebold y R. S. Mariano, “Comparing Predictive Accuracy” *Revista Journal of Business and Economic Statistics*, vol. 13, no. 2, 1993, pp. 253-265. ↑ 177

Laura Camila Roldán Martínez

Ingeniera Financiera de la Universidad Piloto de Colombia, su interés por los temas financieros la han llevado a iniciar profundas investigaciones y seguimientos a los mercados financieros en América Latina y en particular al mercado de divisas. Actualmente se desempeña como analista financiera y sigue trabajando en temas de profundización en los pronósticos financieros.



Research

New Algorithms for $\delta\gamma$ -Order Preserving Matching

Nuevos Algoritmos para Búsqueda de Orden $\delta\gamma$

Juan Mendivelso^{*1}, Rafael Niquefa², Yoan Pinzón³, Germán Hernández¹

¹Universidad Nacional de Colombia, ²Politécnico Gran Colombiano, ³Pontificia Universidad Javeriana

*Correspondence email: jcmendivelsom@unal.edu.co

Received: 14/04/2018. Modified: 14/05/2018. Accepted: 28/05/2018

Abstract

Context: Order-preserving matching regards comparing the relative order of symbols within different strings. However, its application areas require more flexibility in the matching paradigm. We advance in this direction in this paper that extends our previous work [27].

Method: We define $\delta\gamma$ -order preserving matching as an approximate variant of order-preserving matching. We devise two solutions for it based on segment and Fenwick trees: *segtreeBA* and *bitBA*.

Results: We experimentally show the efficiency of our algorithms compared to the ones presented in [26] (*naiveA* and *updateBA*). Also, we present applications of our approach in music retrieval and stock market analysis.

Conclusions: Even though the worst-case time complexity of the proposed algorithms (namely, $O(nm \log m)$) is higher than the $\Theta(nm)$ -time complexity of *updateBA*, their $\Omega(n \log n)$ lower bound makes them more efficient in practice. On the other hand, we show that our approach is useful to identify similarity in music melodies and stock price trends through real application examples.

Keywords: String searching, experimental algorithm analysis, strings similarity metric.

Language: English.

Resumen

Contexto: El emparejamiento de cadenas según el orden compara la estructura de las cadenas de texto. Sin embargo, sus áreas de aplicación requieren mayor flexibilidad en el criterio de comparación. Este artículo avanza en esta dirección al extender [27].

Método: Se define la búsqueda de orden- $\delta\gamma$ como una variante aproximada del problema de emparejamiento de cadenas según orden. Se proponen dos soluciones basadas en árboles de segmentos y árboles Fenwick: *segtreeBA* and *bitBA*.

Resultados: La eficiencia de los algoritmos propuestos se muestra experimentalmente comparándolos con los algoritmos presentados en [26] (*naiveA* y *updateBA*). Además, se presentan aplicaciones.

Conclusiones: A pesar de que la complejidad en tiempo de peor-caso de los algoritmos propuestos (a decir, $O(nm \log m)$) es mayor que la complejidad de *updateBA* ($\Theta(nm)$), su cota baja $\Omega(n \log n)$ los hace más eficientes en la práctica. También se muestran aplicaciones del enfoque propuesto en recuperación de música y análisis del mercado de acciones con ejemplos reales.

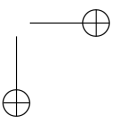
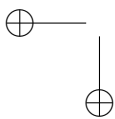
Palabras clave: Análisis experimental de algoritmos, búsqueda de texto, métrica de similitud.

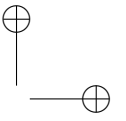
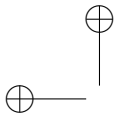
Open access



© The authors; Cite this work as: J. Mendivelso, R. Niquefa, Y. Pinzón, G. Hernández New Algorithms for $\delta\gamma$ -Order Preserving Matching, Ingeniería, vol. 23, no. 2, pp. 190-202, 2018.

©The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco Jos de Caldas.
<https://doi.org/10.14483/23448393.13248>





1. Introduction

Stringology is the branch of computer science that is dedicated to the study of problems in which sequences are involved. One of the main problems of interest in stringology is *string matching*, which consists of finding the occurrences of a pattern P within a text T both defined over a given alphabet Σ . Let $T_{0\dots n-1}$ represent a length- n string defined over Σ . The symbol at the position i of a string T is denoted as T_i . Also, $T_{i\dots j}$ represents the substring of the text T from the position i to the position j , i.e. $T_{i\dots j} = T_i T_{i+1} \cdots T_j$, where it is assumed that $0 \leq i \leq j < n$. In particular, we are interested in each length- m substring that starts at position i of the text, i.e. $T_{i\dots i+m-1}$, $0 \leq i \leq n - m$, which we call *text window* and denote as T^i in the rest of the paper. Then, the output of the exact string matching problem should list all the positions i , $0 \leq i \leq n - m$, such that $P_j = T_{i+j}$ for all $0 \leq j \leq m - 1$.

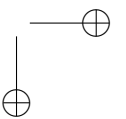
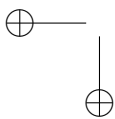
In this paper, two variants of the problem of exact search of patterns are combined: the $\delta\gamma$ -matching problem and the order preserving matching problem. Both of them consider integer alphabets. The $\delta\gamma$ -matching problem consists of finding all the text windows in T for which $\max_{0 \leq j \leq m-1} |P_j - T_{i+j}| \leq \delta$ and $\sum_{j=0}^{m-1} |P_j - T_{i+j}| \leq \gamma$. This is denoted as $P \stackrel{\delta\gamma}{\approx} T^i$. We can see that δ limits the individual error of each position while γ limits the total error. Then, $\delta\gamma$ -matching has applications in bioinformatics, computer vision and music information retrieval, to name some. Cambouropoulos et al. [3] was perhaps the first to mention this problem motivated by Crawford's work et al. [6]. Recently, it has been used to make flexible other string matching paradigms such as parameterized matching [20], [21], function matching [22] and jumbled matching [23], [24].

On the other hand, *order-preserving matching* considers the order relations within the numeric strings rather than the approximation of their values. Specifically, the output of this problem is the set of text windows whose natural representation match the natural representation of the pattern. The natural representation of a string is a string composed by the rankings of each symbol in such string. In particular, the ranking of symbol T_i of string $T_{0\dots n-1}$ is:

$$\text{rank}_T(i) = 1 + |\{T_j < T_i : 0 \leq j, i < n \wedge i \neq j\}| + |\{T_j = T_i : j < i\}|.$$

Then, the natural representation of T is $\text{nr}(T) = \text{rank}_T(0)\text{rank}_T(1) \cdots \text{rank}_T(n-1)$. Therefore, order preserving matching consists of finding all the text windows T^i such that $\text{nr}(P) = \text{nr}(T^i)$. Note that this problem is interested in matching the internal structure of the strings rather than their values. Then, it has important applications in music information retrieval and stock market analysis. Specifically, in music information retrieval, one may be interested in finding matches between relative pitches; similarly, in stock market analysis the variation pattern of the share prices may be more interesting than the actual values of the prices [18]. Since Kim et al. [18] and Kubica et al. [19] defined the problem, it has gained great attention from several other researchers [4], [5], [7]–[9], [11], [14], [14], [15].

Despite the extensive work on order-preserving matching, the only approximate variant in previous literature, to the best of our knowledge, was recently proposed by Uznański and Gawrychowski [13]. In particular, they allow k mismatches between the pattern and each text window. Then, they regard the number of mismatches but not their magnitude. In this paper, we propose a different approach to approximate order-preserving matching that bounds the magnitude of the mismatches



through the $\delta\gamma$ - distance. Specifically, δ is a bound between the ranking of each character in the pattern and its corresponding character in the text window; likewise, γ is a bound on the sum of all such differences in ranking. Thus, δ and γ respectively restrict the magnitude of the error individually and globally across the strings. We define $\delta\gamma$ -order-preserving matching as the problem of finding all the text windows in T that match the pattern P under this new paradigm. This paper is an extended version of the work [27] presented in the Workshop on Engineering Applications 2017. Furthermore, some of its contents were developed in the Master's Thesis [25].

We first defined the notion of $\delta\gamma$ -order preserving matching in [26]. Now, in this paper, we provide a more formal definition and two new algorithms for this problem in Section 2. Then, we present some experimental results of the proposed algorithms and discuss some applications in Section 3. Finally, the concluding remarks are presented in Section 4.

2. Methods

In Section 2.1 we formally define $\delta\gamma$ -order preserving matching while we present its solutions in Section 2.2.

2.1. Definition of $\delta\gamma$ -order preserving matching problem ($\delta\gamma$ -OPMP)

The motivation to define $\delta\gamma$ -order-preserving matching stems from the observation that the application areas of order-preserving matching, mainly stock market analysis and music information retrieval, require to search for occurrences of the pattern that may not be exact but rather have slight modifications in the magnitude of the rankings. For example, let us assume that the text T presented in Figure 1 is a sequence of stock prices and that we want to determine whether it contains similar occurrences of the pattern P (also shown in this figure). Under the exact order-preserving matching paradigm, there are no matches, but there are similar occurrences at positions 1 and 11. In particular, $T_{1..8}$ and $T_{11..18}$ are similar, regarding order structure, to the pattern. This similarity can be seen even more clearly if we consider natural representations of these strings (also shown in Figure 1). Next we formally define these notions.

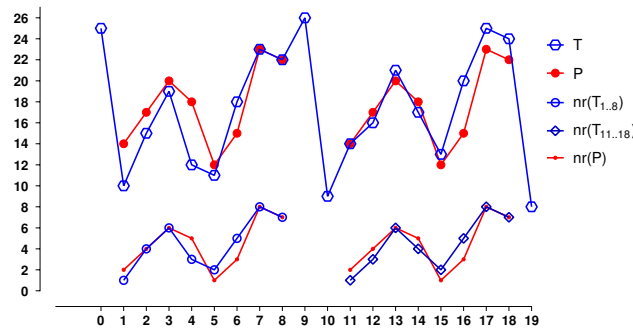
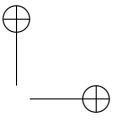
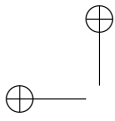


Figure 1: Order preserving matching under $\delta\gamma$ approximation example.



Definition 1 ($\delta\gamma$ -order-preserving match) Let $X = X_{0\dots m-1}$ and $Y = Y_{0\dots m-1}$ be two equal-length strings defined over Σ_σ . Also, let δ, γ be two given numbers ($\delta, \gamma \in \mathbb{N}$). Strings X and Y are said to $\delta\gamma$ -order-preserving match, denoted as $X \overset{\delta\gamma}{\rightsquigarrow} Y$, iff $nr(X) \overset{\delta\gamma}{\cong} nr(Y)$.

Given $\delta = 2, \gamma = 6, X = \langle 10, 15, 19, 12, 11, 18, 23, 22 \rangle$ and $Y = \langle 14, 17, 20, 18, 12, 15, 23, 22 \rangle$, $X \overset{\delta\gamma}{\rightsquigarrow} Y$ as $nr(X) = \langle 1, 4, 6, 3, 2, 5, 8, 7 \rangle$, $nr(Y) = \langle 2, 4, 6, 5, 1, 3, 8, 7 \rangle$ and $nr(X) \overset{\delta\gamma}{\cong} nr(Y)$.

Problem 1 ($\delta\gamma$ -order-preserving matching) Let $P = P_{0\dots m-1}$ be a pattern string and $T = T_{0\dots n-1}$ be a text string, both defined over Σ_σ . Also, let δ, γ be two given numbers ($\delta, \gamma \in \mathbb{N}$). The $\delta\gamma$ -order-preserving matching problem is to calculate the set of all indices $i, 0 \leq i \leq n - m$, satisfying the condition $P \overset{\delta\gamma}{\rightsquigarrow} T^i$. From now on $\delta\gamma$ -OPMP.

2.2. Algorithms for the $\delta\gamma$ -OPMP

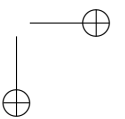
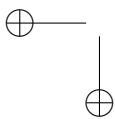
In this section, we present two algorithms that solve the $\delta\gamma$ -OPMP: one that uses segment trees (Section 2.2.1) and the other utilizes Fenwick trees (Section 2.2.2).

2.2.1. Segment tree based algorithm (*segtreeBA*)

The segment tree is a powerful data structure that answers queries in ranges of an underlying array A [2], [10]. We use the segment tree data structure to solve the range minimum query (*RMQ*) problem, which consists in finding the index of the minimum value of the array in a given range, and we are able to change elements of the array. Building a segment tree to solve the *RMQ* problem for an array A of length $|A|$ takes $O(|A|)$ space and time. The update and query operations both take $O(\lg |A|)$. Based on this data structure, we propose the algorithm called *settreeBA* (see Figure 2). It first calculates the natural representation of the pattern P (line 1 in Figure 2). Then, it iterates over all possible position and tries to find $\delta\gamma$ -order preserving matches in every one of them. The process of finding a match at position i in T is as follows: First the algorithm finds the smallest number in the interval $[i, i + m - 1]$ (line 8); this value has the rank 1 in the sliding window T^i . It then uses the natural representation of P to check the δ and γ restrictions for the rank 1 in the window T^i . Then it prepares the segment tree for the next iteration; this is done by changing the smallest value in the interval $[i, i + m - 1]$ to infinity, so in the next iteration of the first inner loop the operation *querySegTree*(*minIndex*, $i, i + m - 1$) finds the second smallest value in the same interval. This process is done for all the rankings from 1 to m .

In the second inner loop (lines 17 and 18 in Figure 2), the values of T in the interval $[i, i + m - 1]$ must be changed so that, in the next window, those contain the original values of T and no infinity. The arrays *oldValue* and *changedIndex* help in the process of restoring the segment tree. We are going to adapt the standard operations of the segment tree to this solution as follows:

- *buildSegTree*($T, 0, n - 1$): Builds a segment tree with T_0, T_1, \dots, T_{n-1} and returns the root node. The complexity is $O(n)$.
- *updateSegTree*(*minIndex*, i, x): Sets T_i to x . The complexity is $O(\lg n)$.
- *querySegTree*(*minIndex*, i, j): Returns the index of the minimum value among T_i, T_{i+1}, \dots, T_j . If there are several minimum values, the leftmost (smallest index) is chosen. The complexity is $O(\lg n)$.



Algorithm 1: $\delta\gamma$ -OPMP *segtreeBA*

Input: $P = P_{0..m-1}, T = T_{0..n-1}, \delta, \gamma$
Output: $\{i \in \{0, \dots, n - m\} : T^i \overset{\delta\gamma}{\rightsquigarrow} P\}$

1. **Create as Array:** $P^{nr} \leftarrow nr(P)$
2. **Create as Array of size m :** $oldValue, changedIndex$
3. **Create as Segment Tree:** $minIndex \leftarrow buildSegTree(T, 0, n - 1)$
4. **Define:** $curDelta, curGamma, rank, idxT, idxP, nChanges$ as integers
5. $nChanges \leftarrow 0$
6. **for** $i = 0 \rightarrow n - m$ **do**
7. **for** $rank = 1 \rightarrow m$ **do**
8. $idxT \leftarrow querySegTree(minIndex, i, i + m - 1)$
9. $idxP \leftarrow idxT - i$
10. $curDelta \leftarrow |rank - P_{idxP}^{nr}|$
11. $curGamma \leftarrow curGamma + curDelta$
12. **if** $curDelta > delta \vee curGamma > gamma$ **then break loop**
13. $changedIndex_nChanges \leftarrow idxT$
14. $oldValue_nChanges \leftarrow T_{idxT}$
15. $nChanges \leftarrow nChanges + 1$
16. $updateSegTree(minIndex, idxT, \infty)$
17. **for** $c = 0 \rightarrow nChanges - 1$ **do**
18. $updateSegTree(minIndex, changedIndex_c, oldValue_c)$
19. **if** $rank > m$ **then report** i
20. $nChanges \leftarrow 0$

Figure 2: Segment tree based algorithm: *segtreeBA*.

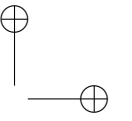
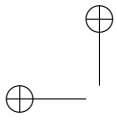
The total complexity of the algorithm is then $O(nm \lg n)$ with a lower bound of $\Omega(n \lg n)$.

2.2.2. Fenwick tree based algorithm (*bitBA*)

The Binary Indexed Tree (*BIT*) or Fenwick tree, is a data structure that can be used to maintain and query cumulative frequencies [12]. In particular, it is mainly used to efficiently calculate prefix sums in an array of numbers. Based on this data structure, we propose the algorithm called *bitBA* (see Figure 3). The BIT data structure could be considered then as an abstraction of an integer array of size n indexed from 1, i.e., a bit encapsulate $A = A_1 A_2 \dots A_n$. The version we are going to use has two operations:

- $sumUpTo(tree, i)$: Returns $A_1 + A_2 + \dots + A_i$. The complexity is $O(\lg n)$.
- $addAt(tree, i, x)$: Sums x to A_i . The complexity is $O(\lg n)$.

The algorithm has a preprocessing phase in which the data structures needed to solve the $\delta\gamma$ -OPMP are created. This is done with a complexity of $\Theta(n + n \lg n + m \lg m)$. The term n is due to the creation of the BIT. The term $n \lg n$ is due to the creation of T^{nr} and the term $m \lg m$ is due to the creation of P^{nr} . In the searching phase, it iterates over all possible positions in the text T to find the existing matches. For each position i to be considered, the algorithm uses the BIT to get the rank of every symbol in the searching window $T_{i..i+m-1}$, and then each rank in the window is compared with each rank in P^{nr} to check if T^i is a $\delta\gamma$ -order preserving match. This operation is evaluated using the function $isAMatch(P, T^i, \delta, \gamma)$; in particular, this function returns true *iff*



$P \stackrel{\delta\gamma}{\rightsquigarrow} T^i$ and this takes $O(m \lg m + m)$. Each rank calculation using the BIT costs $O(\lg n)$. Then the total complexity of the algorithm is $O(nm \lg n)$, but with a lower bound of $\Omega(n \lg n)$.

In the preprocessing phase, the algorithm first creates the natural representations of the pattern P and the text T (P^{nr} and T^{nr} , respectively). Then, it creates a BIT which is an encapsulation of an array with n positions numbered from 1 to n . Then assigns 1 the positions $T_0^{nr}, T_1^{nr}, \dots, T_{m-2}^{nr}$ (Lines 1 to 5 in Figure 3). In the searching phase, for each candidate position i , the algorithm computes the rank of each symbol $T_{i+j}, 0 \leq j \leq m-1$ using $sumUpTo(i+j)$. After checking if there is a match at position i , the BIT must be updated in each iteration to consider symbol T_{i+m} (line 7 in Figure 3). And the BIT must be updated so it does not consider the position i in the next search window (line 9 in Figure 3).

Algorithm 2: $\delta\gamma$ -OPMP bitBA

Input: $P = P_{0\dots m-1}, T = T_{0\dots n-1}, \delta, \gamma, \Sigma_\sigma$
Output: $\{i \in \{0, \dots, n-m\} : T^i \stackrel{\delta\gamma}{\rightsquigarrow} P\}$
1. **Create as Array:** $T^{nr} \leftarrow nr(T)$
2. **Create as Array:** $P^{nr} \leftarrow nr(P)$
3. **Create as Array of size n:** *bit*
4. **for** $i = 0 \rightarrow m-2$ **do**
5. *addAt*(*bit*, T_i^{nr} , 1)
6. **for** $i = 0 \rightarrow n-m$ **do**
7. *addAt*(*bit*, T_{i+m-1}^{nr} , 1)
8. *isAMatch*($i, bit, T^{nr}, P^{nr}, \delta, \gamma$) **then report** i
9. *addAt*(*bit*, T_i^{nr} , -1)

Figure 3: BIT based algorithm: *bitBA*.

3. Results

In Section 3.1 we present experimental results on the proposed algorithms while we present applications for $\delta\gamma$ -order preserving matching in Section 3.2.

3.1. Experiments on Artificial Data

In this section, we describe the experimental setup we designed to evaluate the performance of the proposed algorithms. We compare our algorithms with two baseline algorithms: The naive algorithm, which we call *naiveA*, and *updateBA*, presented in [26]. The former, whose time complexity is $\Theta(nm \lg m)$, considers all possible positions in the text and, for each one of them, verifies if there is a match in $\Theta(m \lg m + m)$ time. The latter algorithm, whose time complexity is $\Theta(nm)$, is based on linear update and verification.

We present the experimental framework (Section 3.1.1) and describe the data generation (Section 3.1.2). Then, we discuss the results obtained (Section 3.1.3). Finally we show the results of the experiments intended to study how the algorithms *segtreeBA* and *bitBA* behave in the worst-case scenario for all experiment instances (Section 3.1.4).

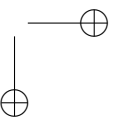
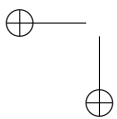


Table I: Experimental values of n , m , δ , γ and σ .

	Varying n	Varying m	Varying δ	Varying γ	Varying σ
n	[3000, 60000] $\Delta n = 3000$	10000	10000	10000	10000
m	40	[30, 600] $\Delta m = 30$	40	40	40
δ	10	10	[0, 228] $\Delta\delta = 12$	10	10
γ	60	60	60	[0, 570] $\Delta\gamma = 30$	60
σ	100	100	100	100	[12, 240] $\Delta\sigma = 12$

3.1.1. Experimental setup

Hardware and software: All the algorithms were implemented using C++. The computer used for the experiments was a Lenovo ThinkPad with a processor Intel(R) Core(TM) i7 4600u CPU @ 2.10GHz 2.69 GHz and installed RAM memory of 8GB. The computer was running 64-bit Linux Ubuntu 14.04.5 LTS. The C++ compiler version was g++ (Ubuntu 4.8.4-2ubuntu1 14.04.3) 4.8.4.

Parameters: To show how our solution behaves with different configuration of the different parameters, we perform five types of experiments. In each experiment, we vary one of the given parameters n , m , δ , γ and σ , and let the other four parameters fixed at a given value. We chose the fixed values after several attempts via try and error to find values that produced results varying from no matches to matches near the value of n . For each experiment type, we performed five different experiments and took the median as the value to plot, making the median of five experiments the representative value for a experiment configuration of values n , m , δ , γ and σ . The variation of the parameter values for each experiment type is presented in Table I.

3.1.2. Random data generation

An experiment consists of two stages. The first stage is the pseudo-random generation of a text T of length n and the pattern P of length m . The second stage is the execution of the algorithms on the generated strings P and T . The random generation of each character of both the pattern P and the text T is done by calling a function that pseudo-randomly and selects a number between 1 and σ with an uniform probability distribution, i.e., all symbols have the same probability to appear in a position and for that reason, on average, every symbol in the alphabet will appear with the same frequency on an arbitrary generated string.

3.1.3. Experimental results and analysis

The first result to highlight is the fact that, in every experiment, the naive algorithm always has the worst performance, as expected. We found that the size of the alphabet and the parameters δ and γ have practically no impact on the execution time of any of the algorithms, they all show nearly constant time behavior. Figures 4a and 4b verify the theoretical complexity analysis that states that n and m are the parameters that really determine the growth in the execution time of all

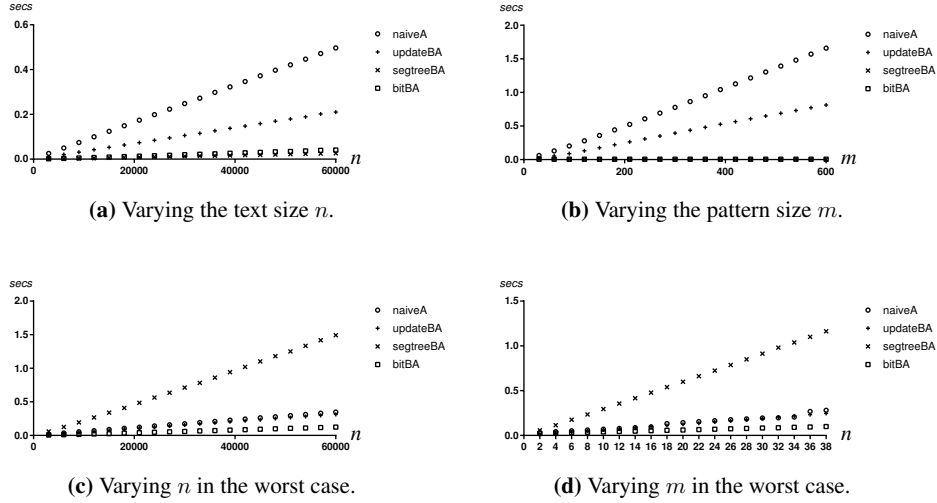


Figure 4: Experimental results of comparing the four algorithms by varying different parameters.

the algorithms. In Figure 4a, m is a constant and n is a variable while in Figure 4b, n is a constant and m is a variable. It is important to notice that, under these conditions, the graphs are expected to be linear and the experiments verify that.

In the figures where we show the result of varying the parameter n and the parameter m , (Figures 4a-4b), we can see that the best two algorithms are the based on data structures (*segtreeBA* and *bitBA*). This despite the fact that these two algorithms have a higher upper bound on their complexities in relation with the first two algorithms (*naiveA* and *updateBA*). This result can be explained by the fact that the lower bound on the data structure based algorithms is considerably lower in comparison with the other two. The lower bound of the data structures based algorithms is $\Omega(n \lg n)$ and the lower bound of the *naiveA* and *updateBA* is the same as their upper bound meaning they are $\Theta(nm \lg m)$ and $\Theta(nm)$ respectively. This can be understood by taking into account that the first two algorithms check for a match after a natural representation of every window is completely obtained; on the contrary, data structure based algorithms break the calculation of a given natural representation of a window if at some point the δ or γ restriction do not hold.

Given the result of the experiments, it is safe to say that the algorithms based on data structures are faster in most cases, especially if they are going to be used in applications where very few matches are expected to appear. This is due to their lower bound of complexity. We test two different implementations of the segment tree data structure: one based on classes and pointers, and the other based on an array. Ultimately, we recommend to chose the array based as representative for the segment tree based solution and the experiments plots show their results. The array-based segment tree is almost twice time faster than the classes-based implementation.

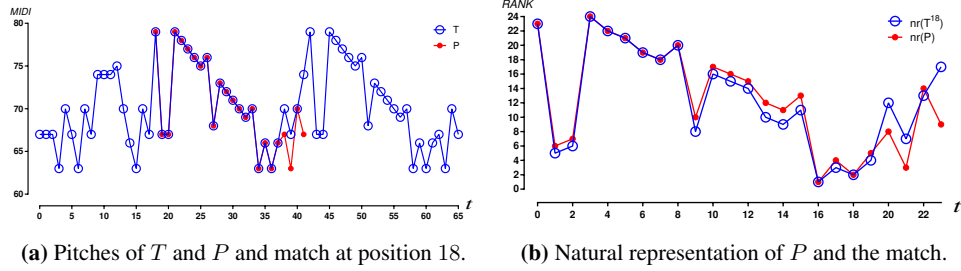


Figure 5: Darth Vader's theme from Star Wars by John Williams (Excerpt).

3.1.4. Worst case experiments on *segtreeBA* and *bitBA*

Taking into account that the first two algorithms, *naiveA* and *updateBA* both have complexities in Big Theta notation, i.e. their worst case is the same as their best case, the experiments described so far are enough for their experimental analysis. For the data structures based algorithms a more particular kind of experiment is needed, i.e. the worst case experimental analysis. For this algorithms the worst case is when there is a match in every candidate position. An easy way to generate data for the worst case is when all the symbols in both the pattern P and the text T are the same. Other way to generate worst cases scenarios for this two algorithms is when either both P and T are strictly increasing or both are strictly decreasing. Results from this experiments show a fast degradation in experimental performance of the *segtreeBA* algorithm, but a very slow degradation of the *bitBA* algorithm. Results of this last experiments are shown in Figures 4c and 4d.

3.2. Applications

In this section we show a couple of applications of the defined problem, in music and finance.

3.2.1. Application in music

For the music application example, we choose the main theme from The Imperial March, soundtrack of the film series Star Wars [17] composed by John Williams [16] also known as the Darth Vader's theme because it represents him. This melody sounds every time this villain has a significant scene. Here we use an integer alphabet abstraction of a music piece, where each note of the melody is an integer. This abstraction of music takes into account only the pitch leaving out other aspects as silences, note duration, harmony, or instrumentation, but it gives a very good idea of the possible applications in music retrieval. The alphabet for music applications could be for example the given by the MIDI (Musical Instrument Digital Interface) technical standard [1], [28]. In the MIDI standard, the first note, 0 is a C note of the octave 0 (the lowest octave), note 1 is a $C\#$ of the same octave and so on. There could be up to note 127 which will be a G in the 10th octave.

We draw an example of $\delta\gamma$ -OPM with the same musical piece. We consider a 66-pitch excerpt of the main melody as the text $T = T_{0..65}$, and from the same excerpt we extract $T_{42..65}$ as the pattern P (see Figure 5a). For $\delta = 8$ and $\gamma = 32$, we found a match in position 18 which for professional musicians, and even non professional musicians, sounds very similar to the pattern. Namely,

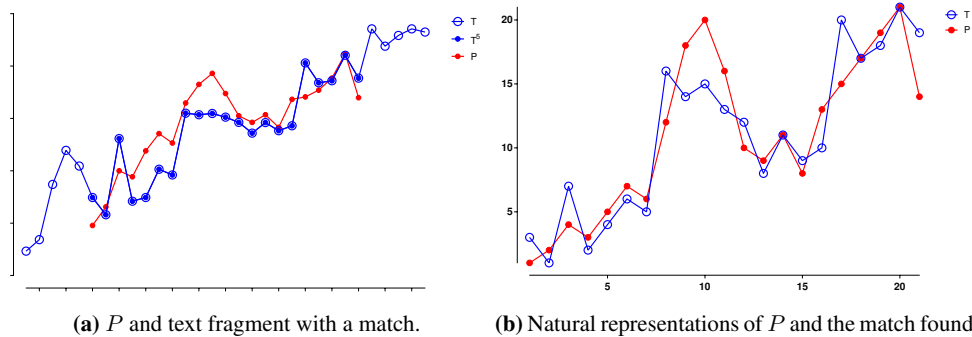


Figure 6: Stock price of the Facebook company from May 18 2012 to March 31 2017.

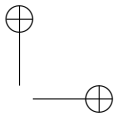
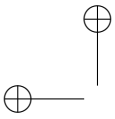
Gabriela Rojas, a professional musician from the National University of Colombia Conservatory found the match similar to the pattern. The parameters δ and γ were chosen by attempting different values of both starting from 0 and increasing them until more matches were found. Furthermore, we can see in Figure 5a how similar the pitches of the pattern and the match are. In Figure 5b we show the similarity of their natural representation. This gives us an idea of possible applications in musical retrieval of approximate string matching. This can be useful for the advanced music students in order to help them with the theoretical analysis of the scores so they can look for melodic similarities or differences either in the same piece or comparing different pieces.

3.2.2. Application in finance

For the finance application we choose to analyse the stock price of the Facebook company. We take the history of the stock price of Facebook from May 18 2012 to March 31 2017 as the text T (the size of this text is 1225). As the pattern, we take the 21-day period starting in February 28 2017 up to March 28 2017. Take into account that not all days the stock actions change, for that reason we choose 21 days which is approximately the amount of days the stock actions change in a month. In Figure 6a we show the pattern and the portion of the text that we found to be the most similar to the pattern. In this figure we omit the y and x axes labels because we want to show the similarity in shape of the pattern and the search window, not the similarity in absolute values which indeed is quite different. In fact the values in the pattern to search are values lower than 34 and the text window found has values greater than 100. Finally, in Figure 6b we show the natural representation (or ranks) of both the pattern P and the match found. We can see that they have a similar structure. We selected the pattern randomly and then attempted to find its matches with different values for δ and γ . Given that a 21 day period is not a short period, it was expected that we just found one match in the given text window.

4. Conclusions and Discussion

We define a new variant of the string matching problem, the $\delta\gamma$ -order preserving matching problem ($\delta\gamma$ -OPMP). This new variant provides the possibility of searching a pattern according to the relative order of the symbols as the order preserving matching problem. But it also gives more flex-



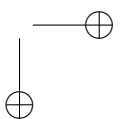
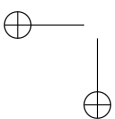
ibility to the search by allowing error in the individual ranking comparisons through the parameter δ . And also, the proposed problem gives a bound for the global error in the comparison of a pattern against a text window through γ . This new variant has at least the same applications as the order preserving matching problem.

Our experimental results on randomly generated data show that in most cases, given the uniformly data generation, the proposed algorithms work faster than the naive solution and *updateBA*. One question that remains open is if an algorithm with better worst case time complexity than $O(nm)$ can be designed; other question that also remains open is that if an algorithm with better lower bound than $\Omega(n \lg n)$ can be obtained. We show experimental results on the worst cases of the *bitBA* and *segtreeBA*. We conclude that the degradation in performance in the *segtreeBA* algorithm is much more notorious than the degradation of *bitBA*. It still remains open to prove empirically that we can devise an experimental setup where the best worst-case algorithm, *updateBA* experimentally beats the other three algorithms. Given the theory behind the big O notation, we can say that such experimental setup exist.

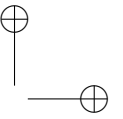
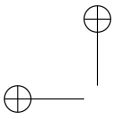
We show two applications with real data in music and finance. In music we use our findings to search for a portion of a melody in the melody itself. Those two portions of the melody are also very similar according to professional musicians consulted. For the financial application, we show how similar the changes in stock prices are despite the difference in their absolutes values. An aspect left to explore related to the applications is to establish whether, in the finance application, the tools presented here can be useful to device or complement algorithms/techniques to make predictive analysis of stock price changes. In music, our contributions can be useful to design tools for advanced music students in order to help them with the theoretical analysis of the scores so they can look for melodic similarities or differences either in the same piece or comparing different pieces. Also composers could see the $\delta\gamma$ -OPMP, as a tool to check the perception they have about the similarity of musical ideas developed in different ways in one or several pieces of their own. For the musicologist this could be a way to track the development of one composer's musical ideas throughout their life and to analyze the way the composer evolves.

References

- [1] MIDI Association. Midi official webpage. [Online]. Available <https://www.midi.org/>. 198
- [2] Peter Brass. *Advanced Data Structures*. Cambridge University Press, 2008. 193
- [3] Emiliós Cambouropoulos, Maxime Crochemore, Costas Iliopoulos, Laurent Mouchard, and Yoan Pinzon. Algorithms for computing approximate repetitions in musical sequences. *International Journal of Computer Mathematics*, 79(11):1135–1148, 2002. 191
- [4] Tamanna Chhabra, M. Oğuzhan Kulekci, and Jorma Tarhio. Alternative algorithms for order-preserving matching. In Jan Holub and Jan Žďárek, editors, *Proceedings of the Prague Stringology Conference 2015*, pages 36–46, Czech Technical University in Prague, Czech Republic, 2015. 191
- [5] Tamanna Chhabra and Jorma Tarhio. Order-preserving matching with filtration. In *Proceedings of the 13th International Symposium on Experimental Algorithms - Volume 8504*, pages 307–314, New York, NY, USA, 2014. Springer-Verlag New York, Inc. 191
- [6] Tim Crawford, Costas S. Iliopoulos, and Rajeev Raman. String-Matching Techniques for Musical Similarity and Melodic Recognition. *Computing in Musicology*, 11:71–100, 1998. 191
- [7] Maxime Crochemore, Costas S. Iliopoulos, Tomasz Kociumaka, Marcin Kubica, Alessio Langiu, Solon P. Pissis, Jakub Radoszewski, Wojciech Rytter, and Tomasz Waleń. *Order-Preserving Incomplete Suffix Trees and Order-*



- Preserving Indexes*, pages 84–95. Springer International Publishing, Cham, 2013†. 191
- [8] Maxime Crochemore, Costas S. Iliopoulos, Tomasz Kociumaka, Marcin Kubica, Alessio Langiu, Solon P. Pissis, Jakub Radoszewski, Wojciech Rytter, and Tomasz Walen. Order-preserving suffix trees and their algorithmic applications. *CoRR*, abs/1303.6872, 2013†. 191
- [9] Maxime Crochemore, Costas S. Iliopoulos, Tomasz Kociumaka, Marcin Kubica, Alessio Langiu, Solon P. Pissis, Jakub Radoszewski, Wojciech Rytter, and Tomasz Waleń. Order-preserving indexing. *Theor. Comput. Sci.*, 638(C):122–135, July 2016†. 191
- [10] Mark de Berg, Otfried Cheong, Marc van Kreveld, and Mark Overmars. More geometric data structures: Windowing. *Computational Geometry: Algorithms and Applications*, pages 219–241, 2008†. 193
- [11] Simone Faro and M. Oguzhan Külekcı. Efficient algorithms for the order preserving pattern matching problem. *CoRR*, abs/1501.04001, 2015†. 191
- [12] Peter M Fenwick. A new data structure for cumulative frequency tables. *Software: Practice and Experience*, 24:327–336, 1994†. 194
- [13] Paweł Gawrychowski and Przemysław Uznański. Order-preserving pattern matching with k mismatches. *Theoretical Computer Science*, 638:136 – 144, 2016†. Pattern Matching, Text Data Structures and Compression Issue in honor of the 60th birthday of Amihoud Amir†. 191
- [14] Md Mahbulul Hasan, ASM Shohidull Islam, Mohammad Saifur Rahman, and M Sohel Rahman. Order preserving pattern matching revisited. *Pattern Recognition Letters*, 55:15–21, 2015†. 191
- [15] Md Mahbulul Hasan, ASM Shohidull Islam, Mohammad Saifur Rahman, and M Sohel Rahman. Order preserving prefix tables. In *International Symposium on String Processing and Information Retrieval*, pages 111–116. Springer, 2014†. 191
- [16] Inc IMDb. John Williams imdb profile. [Online]. Available <http://www.imdb.com/name/nm0002354/>†. 198
- [17] Inc IMDb. Star Wars: Episode V - The Empire Strikes Back (original title) imdb page. [Online]. Available <http://www.imdb.com/title/tt0080684/>†. 198
- [18] Jinil Kim, Peter Eades, Rudolf Fleischer, Seok-Hee Hong, Costas S. Iliopoulos, Kunsoo Park, Simon J. Puglisi, and Takeshi Tokuyama. Order-preserving matching. *Theoretical Computer Science*, 525:68 – 79, 2014. Advances in Stringology†. 191
- [19] Marcin Kubica, Tomasz Kulczyński, Jakub Radoszewski, Wojciech Rytter, and Tomasz Waleń. A linear time algorithm for consecutive permutation pattern matching. *Information Processing Letters*, 113(12):430–433, 2013†. 191
- [20] Inbok Lee, Juan Mendivelso, and Yoan J. Pinzón. $\delta\gamma$ - Parameterized Matching, pages 236–248. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009†. 191
- [21] Juan Mendivelso. Definition and solution of a new string searching variant termed $\delta\gamma$ -parameterized matching. Master’s thesis, National University of Colombia, Bogota, Colombia, 2010†. 191
- [22] Juan Mendivelso, Inbok Lee, and Yoan J. Pinzón. *Approximate Function Matching under δ - and γ - Distances*, pages 348–359. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012†. 191
- [23] Juan Mendivelso, Camilo Pino, Luis F. Niño, and Yoan Pinzón. *Approximate Abelian Periods to Find Motifs in Biological Sequences*, pages 121–130. Springer International Publishing, Cham, 2015†. 191
- [24] Juan Mendivelso and Yoan Pinzón. A novel approach to approximate parikh matching for comparing composition in biological sequences. In *Proceedings of the 6th International Conference on Bioinformatics and Computational Biology (BICoB 2014)*, 2014†. 191
- [25] Rafael Niquefa. Definition and solution of a new approximate variant of the order preserving matching problem. Master’s thesis, Universidad Nacional de Colombia, 2017†. 192
- [26] Rafael Niquefa, Juan Mendivelso, Germán Hernández, and Yoan Pinzón. Order Preserving Matching under $\delta\gamma$ -approximation. In *Congreso Internacional de Ciencias Básicas e Ingeniería*, 2017†. 190, 192, 195
- [27] Rafael Niquefa, Juan Mendivelso, Germán Hernández, and Yoan Pinzón. Segment and fenwick trees for approximate order preserving matching. In *Workshop on Engineering Applications*, pages 131–143. Springer, 2017†. 190, 192
- [28] Thomas Scarff. MIDI note numbers. [Online]. Available http://www.electronics.dit.ie/staff/tscarff/Music_technology/midi/midi_note_numbers_for_octaves.htm†. 198



Juan Mendivelso

Ingeniero de sistemas, MSc, PhD. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Rafael Niquefa

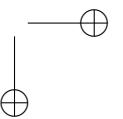
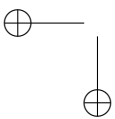
Ingeniero de sistemas, MSc. Grupo de Investigación FICB-PG, Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano.

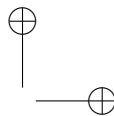
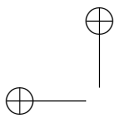
Yoa Pinzón

Ingeniero de sistemas e industrial, MSc, PhD. Universidad Pontificia Javeriana, Cali, Colombia.

Germán Hernández

Ingeniero de Sistemas, MSc, PhD. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.





Instrucciones para los Autores

Introducción

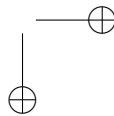
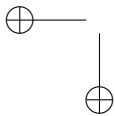
La Revista INGENIERÍA es una publicación de carácter científico con una periodicidad cuatrimestral editada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La Revista está dirigida a la comunidad académica, investigadores, egresados, sectores productivos y en general al público interesado en los 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.

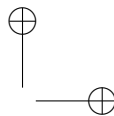
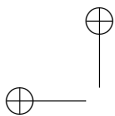
Todo artículo es evaluado de manera doble-ciega por pares revisores antes de ser calificado como candidato para publicar. El Comité Editorial, tomando en cuenta los conceptos emitidos por los evaluadores y el cumplimiento de las políticas editoriales de la Revista, decide la publicación del artículo 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 enfatizar 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):

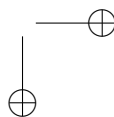
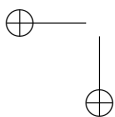
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/4979/11816> (Formato PDF)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5233/11815> (Formato Word)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/9539/10775> (Formato Latex)

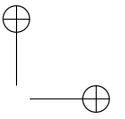
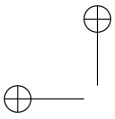
- Los autores relacionarán en el correo de postulación del artículo dos posibles evaluadores que cumplan las siguientes condiciones:

- 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>





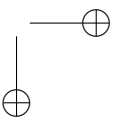
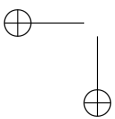
Se puede consultar la guía rápida para autores en la plataforma OJS en el enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5540/7070>

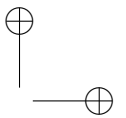
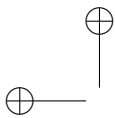
Aspectos a tener en cuenta

- 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 Unported License.





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.

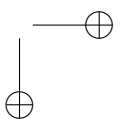
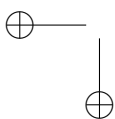
The intended audience of the Journal is the academic community, researchers, graduates, productive sectors and in general the public interested in all engineering disciplines.

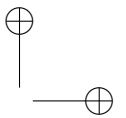
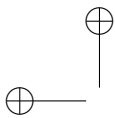
Submitted papers are double-blind peer-reviewed by at least two experts in the field, before being qualified as a candidate to be published. The Editorial Board grounds its acceptance decision on the basis of the recommendations given by the experts and the fulfillment of the editorial policies of the 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'

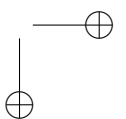
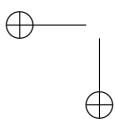
– Have publications in recognised journals in the last two years

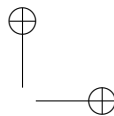
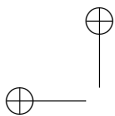
- If accepted for publication, the authors must agree with and submit a copyright form that transfers rights for publication. This form can be downloaded from:

<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

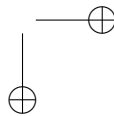
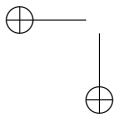
INGENIERÍA Journal advocates and defends the universal principles of good conduct in scientific publication, in particular, those referring to respect for the community, respect for the selfless and voluntary work of peer reviewers and editors, as well as respect to intellectual property. Regarding the 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>

