

Revista de



TECNOLÓGICO

RIDTEC | Vol. 17, N.º 1, 2021, enero – julio 2021

P-ISSN 1680-8894

E-ISSN 2219-6714

Edición Semestral

Publicación Regional



PKP|INDEX



Revista de TECNOLÓGICO

Revista de investigación de la Universidad Tecnológica de Panamá

Volumen 17, Número 2, Edición Semestral, Julio - Diciembre 2021

P – ISSN 1680-8894

E – ISSN 2219-6714

Revista de I+D Tecnológico: revista de investigación en la Universidad Tecnológica de Panamá. - Vol. 16, no. 2 (jul. - dic. 2021). - Panamá: Editorial Tecnológica, 2020.

v.; 27 cm.

Semestral

P- ISSN 1680-8894

E- ISSN 2219-6714

1. Universidad Tecnológica de Panamá - Publicaciones seriadas
2. Investigaciones - Publicaciones seriadas
3. Investigación y desarrollo.

Universidad Tecnológica de Panamá

AUTORIDADES

Ing. Héctor M. Montemayor Á.
Rector

Licda. Alma Urriola de Muñoz
Vicerrectora Académica

Dr. Alexis B. Tejedor De León
Vicerrector de Investigación, Postgrado y Extensión

Mgtr. Mauro Destro Stimamiglio
Vicerrector Administrativo

Mgtr. Ricardo A. Reyes B.
Secretario General

Ing. Brenda Serracín de Álvarez
Coordinadora General de los Centros Regionales

La Revista de I+D Tecnológico (RIDTEC) es una revista indexada abierta (OA) con publicación semestral de la Universidad Tecnológica de Panamá, especializada en las áreas de las ciencias, ingenierías y tecnologías.

Actualmente, la RIDTEC forma parte del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (LATINDEX), y The European Reference Index for the Humanities and the Social Sciences (ERIH PLUS), entre otras como REDIB, ROAD, BASE y OAJI.

Para garantizar un proceso de evaluación libre de sesgo y/o conflictos de intereses, cada artículo ha sido evaluado a través de un proceso de "revisión por pares, doble ciego".



Revista de I+D Tecnológico disponible en:

<http://www.revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico>

Plataforma para la Recepción de Artículos:

<http://www.redinvestigadores.utp.ac.pa/revistal+D/openconf/openconf.php>

© Derechos reservados, UTP

Impreso en Panamá, Ciudad de Panamá

Imprenta de la Universidad Tecnológica de Panamá

Tiraje: 300 ejemplares.



Directorio Editorial

P – ISSN 1680-8894
E – ISSN 2219-6714

Director de la revista

Dr. Orlando Aguilar¹

Editor de la revista

Dr. Orlando Aguilar¹

Coeditores

Lic. Cristian Moreno²

Comité Editorial

Dr. Carlos Medina³

M.Sc. Julio Mario Daza Escorcía⁴

Dr. Jesús Javier Alcantar Peña⁵

Dr. Frederick Wittel⁶

Dr. David Álvarez⁷

Proyección Internacional

Dra. Elida de Obaldía⁸

Comité Científico

Dr. Christian Chapa Gonzalez⁹

Dr. Ronaldo Maghirang¹⁰

Botasso Dr. Hugo Gerardo¹¹

Soporte técnico y bibliometría

Ing. Danny Murillo¹²

Ing. Dalys Saavedra¹²

Dirección de Comunicación Estratégica

Mgter. Danilo Toro¹³

Dra. Libia Batista¹⁴

Mgter. Karin Guillén M.¹⁵

Lcda. Shirley Cedeño¹⁶

Afiliaciones

1. Profesor de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Dirección de Investigación, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.
2. Dirección de Investigación, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
3. Profesor de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
4. Profesor de la Facultad de Ingeniería Industrial, Politécnico de la Costa Atlántica, Colombia.
5. Investigador Titular B, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), Querétaro, México.
6. Docente Administrador, Assoc. Dean of Math, Science, & Health Professions at Richland College, Dallas, Estados Unidos.
7. Docente Investigador, Universidad de los Andes –Bogotá, Colombia.
8. Asesora de investigación de la Vicerrectoría de Investigación, Postgrado y Extensión, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.
9. Docente Investigador, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computacional, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México.
10. Professor adn Associate Dean for Research and Graduate Programs, Kansas State University, Estados Unidos.
11. Profesor Titular ordinario, Universidad Tecnológica Nacional de La Plata, Argentina.
12. Dirección de Innovación en Tecnología Educativa, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.
13. Dirección de Comunicación Estratégica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.
14. Editorial Universitaria, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
15. Diseño gráfico, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.
16. Imprenta, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.



*P*resentación

por Ing. Orlando Aguilar, Ph.D.

Editor en jefe, Revista de I+D Tecnológico
Universidad Tecnológica de Panamá
Julio, 2021

La Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) presenta a la comunidad científica y público en general, la primera edición del año 2020, de la Revista de I+D Tecnológico (RIDTEC), volumen 17, Número 2. Con el propósito de divulgar la labor de investigación científica en la UTP, nace en 2002, RIDTEC, como una revista abierta (OA) evaluada por pares Doble Ciego, con publicación semestral. RIDTEC es la principal revista panameña para la publicación de trabajos de investigación en las áreas de ingeniería y tecnología, apoyando a docentes e investigadores nacionales e internacionales en la publicación de sus trabajos.

El primer artículo de este número muestra la implementación de una metodología para el diseño del slotting, en busca de definir las fases, pasos y procedimientos para demostrar la forma adecuada en que la mercancía debe estar distribuida dentro del almacén; de manera que permita disminuir el tiempo de selección de pedidos e incrementar la productividad del centro de distribución.

El siguiente trabajo propone una heurística para ubicar sistemas de almacenamiento de energía (SAE) asociados a generación distribuida en redes eléctricas georreferenciadas.

El tercer artículo utiliza herramientas de infraestructura como código: Ansible, Terraform, Chef, Puppet; las cuales generan una representación virtual de toda la infraestructura física y escalable de una plataforma Cloud Computing y de Centro de Datos, facilitando que esta sea programable y dinámica.

El cuarto trabajo presenta una revisión literaria apoyada con la norma ISO/IEC 25010, para identificar los requerimientos no funcionales prioritarios para cuatro dominios de aplicación: ciudad, hogar, agricultura y fábricas inteligentes.

El quinto artículo presenta una propuesta para el desarrollo de una herramienta basada en optimización para garantizar el uso adecuado del suelo, mientras se maximiza la ganancia del sistema de producción de alimentos.

El sexto trabajo utilizó las técnicas, procedimientos y herramientas propios de un Sistema de Información Geográfica (SIG), para conocer con exactitud las áreas de amenaza y vulnerabilidad por inundación, mediante el modelo de simulación hidráulica Hec-Ras, con el propósito de realizar la zonificación de amenazas por inundación de la cuenca del Río Caimito, que permite la planificación estratégica de la cuenca e identificar las áreas de evacuación.

El séptimo artículo tiene como objetivo examinar, cualitativamente, el perfil del concreto reforzado desde la superficie hasta cuatro centímetros de profundidad de losas de concreto reforzado expuestas naturalmente por un año a ambientes influenciados por aerosoles de tipo marinos y marino – industrial.

El octavo trabajo muestra la influencia de aspectos técnicos y sociales en la calidad del agua de cuatro acueductos rurales en El Calabacito; sistemas que se abastecen de pozos de agua subterránea.

El siguiente artículo tiene como objetivo proponer un sistema basado en tecnologías de información y comunicación (TICs) para controlar adecuadamente el tiempo de operación de las unidades de acondicionador de aire para reducir el consumo eléctrico total en las empresas que cuentan con equipos que requieren de condiciones ambientales especiales.

El décimo trabajo presenta un sistema de Gestión Integral de Riesgos de Desastres (GIRD) y la metodología para la realización de los planes de acción por cada riesgo potencial establecidos por el creciente dominio de las tecnologías de la información y comunicación (TIC) y la pandemia COVID-19.

El último trabajo presenta una evaluación de diferentes materiales de cambio de fase para determinar su influencia en la mejorar el confort interno de los edificios, y que no impacten negativamente al ambiente, implementando la estrategia de Materiales de Cambio de Fase (Phase Change Materials, PCM).

Contenido

5

Propuesta metodológica para el diseño del slotting de mercancía en centros de distribución
Methodological Proposal for Warehouse Slotting Design
Ricardo Caballero | Ariel González

49

Simulación hidrológica de los impactos del cambio climático en la cuenca del río Caimito, La Chorrera, Panamá Oeste
Hydrological simulation of the impacts of climate change in the Caimito river basin, La Chorrera, Panama Oeste
Marta Moreno | Humberto Álvarez | Angelo

14

Ubicación óptima de sistemas de almacenamiento de energía en redes eléctricas de distribución georreferenciadas
Optimal location of energy storage systems in georeferenced power distribution system

59

Estudio del efecto ambiental industrial y marino sobre concreto reforzado expuesto en dos ciudades del pacífico panameño
Study of the industrial and marine environmental effect on reinforced concrete exposed in two cities in the Panamanian Pacific
Alda de Sánchez | Cecilio Hernández

25

Herramientas de infraestructura como código: Ansible, Terraform, Chef, Puppet
Tool infrastructure as code: ansible, terraform, chef, puppet

66

Diagnóstico de acueductos rurales abastecidos de fuentes subterráneas: caso de estudio El Calabacito, Provincia de Herrera, Panamá
Diagnosis of rural aqueducts supplied from underground sources: El Calabacito case study, Herrera Province, Panama
Yarelis Melgar | Euclides Manuel Deago |

30

Requerimientos no funcionales para sistemas basados en el Internet de las cosas (IoT): Una revisión
Non-functional requirements for Internet of Things (IoT) based systems: A review

77

Uso de herramientas de optimización en el manejo de unidades de acondicionamiento de aire para la reducción del consumo eléctrico
Use of optimization tools in the management of air conditioning units to reduce electricity consumption
Yessica Sáez | Edwin Collado | Martín Poveda |

41

Mejoramiento del uso de suelo en la agricultura mediante herramientas basadas en optimización
Improving land use in agriculture through optimization-based tools
Edgar Castillo | Oliver Delgado | Humberto



Contenido

88

Gestión de riesgos de desastres municipal basado en las TIC: Caso de estudio Panamá

ITC-based Municipal Disaster Risk Management: Panama Case Study
Elvira Meléndez | José Iván Isaza-González | Juan Castillo | Ricardo

98

El cambio de fase como estrategia pasiva: Evaluación del rendimiento térmico-energético en edificaciones en Panamá

Phase Change as a Passive Strategy: Evaluation of the Thermal-energy Performance in Buildings in Panama
Diana Berrocal | Rubí Aranda | Steyci

Indexadores



Base de datos



Repositorios



Directorios



Propuesta metodológica para el diseño del slotting de mercancía en centros de distribución

Methodological proposal for warehouse slotting design

Ricardo Caballero ^{1*}, Ariel González ¹

¹ Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: ricardo.caballero@utp.ac.pa

RESUMEN— La logística es una parte fundamental en la cadena de suministro de cualquier empresa y es por medio de la logística que las empresas pueden poner a disposición de los clientes los productos o servicios que ofrezcan en el tiempo y lugar adecuado. Para que esto sea posible, es necesario resaltar la función que ejerce la logística interna en una empresa. Con la implementación de una metodología para el diseño del slotting, se busca definir las fases, pasos y procedimientos para demostrar la forma adecuada en que la mercancía debe estar distribuida dentro del almacén; de manera que permita disminuir el tiempo de selección de pedidos e incrementa la productividad del centro de distribución. Para ello, se hace una revisión de la literatura existente para conocer las bases fundamentales de la logística interna en un centro de distribución y técnicas utilizadas para analizar el slotting e inventario que ayuden a diseñar una metodología apropiada. Finalmente, se evalúa practicabilidad de la metodología propuesta mediante su implementación en un centro de distribución.

Palabras clave— Cadena de suministro, centro de distribución, administración de inventario, logística interna, selección de pedidos, slotting.

ABSTRACT— Logistics is a key part of the supply chain of any company, and it is through logistics that companies can make the products or services they offer available to customers at the right time and right place. To make this possible, it is necessary to highlight the role of the internal logistics in a company. With the implementation of a methodology for the design of slotting, what is sought is to define the phases, steps and procedures to demonstrate the proper way in which the merchandise must be distributed within the warehouse. As a result, the order picking time is reduced, and therefore productivity is increased in the distribution center. This requires a review of existing literature to learn the fundamentals of internal logistics in distribution centers and techniques used to analyze the slotting and inventory to help design an appropriate methodology. Finally, the practicability of the proposed methodology is evaluated through its implementation in a local distribution center.

Keywords— Supply chain, distribution center, inventory management, intralogistics, picking, slotting

1. Introducción

La logística interna es una sección importante dentro de una empresa, ya que la misma se encarga de gestionar, arreglar, planificar y entregar los productos terminados. Es una parte indispensable de la cadena de suministro y refleja el resultado de la implementación de la estrategia de la empresa [1]. La logística interna abarca diversas tareas dentro de cualquier empresa, ya sea de producción o de distribución de producto terminado. Estas tareas pueden ser: almacenamiento, transporte o picking. Las empresas de distribución, por lo general, presentan

problemas en el área de almacenamiento y picking. Uno de los problemas que enfrenta el almacenamiento son sus altos costos, ya sea por mantener inventario o por pedir cada vez que las existencias se agotan. A su vez, otro de los problemas que existe dentro de un centro de distribución, es la inexistente organización dentro del almacén que, aun estableciéndose no se respeta. Una mala distribución en la línea hace que los recorridos de manipulación también se vean incrementados [2]. Esto influye directamente al momento de realizar el proceso de picking y por tal razón, es imprescindible que, en un

Citación: R. Caballero y A. González, "Propuesta metodológica para el diseño del slotting de mercancía en centros de distribución", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 2, pp. (), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 7 de enero de 2020. **Recibido con correcciones:** 13 de julio de 2020. **Aceptado:** 11 de marzo de 2021.

DOI:

Copyright: 2021 Primera_letra_nombre. Apellido. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

centro de distribución, los productos estén ubicados de tal manera que; al momento de realizar el picking, se cuente con una mínima cantidad de recorridos. Para que esto sea posible, es necesario que se aplique la técnica de asignación de posición de almacenamiento o “slotting” dentro del centro de distribución. Este artículo tiene como objetivo proponer una metodología para diseñar apropiadamente las ubicaciones de mercancía en centros de distribución. Dicha metodología se aplica en una empresa como caso de estudio para analizar el estado actual del almacén y diseñar una propuesta de slotting. Los resultados se presentan y discuten en la cuarta sección de este artículo.

2. Revisión de la literatura

La logística interna se define como “la planificación, la ejecución y el control del flujo físico y de informaciones internas de la empresa, buscando la optimización de los recursos, procesos y servicios con la mayor economía posible” [3]. Esto quiere decir que la logística interna parte desde el momento en la mercancía llega al centro de distribución hasta que la misma está lista para ser enviada a su destino final. La logística interna incluye la organización, gestión y optimización del flujo interno de material y de información. De igual forma, ayuda a que exista una relación entre los recursos con los que cuenta la empresa y lo que los clientes exigen. Cuanto más eficiente sea esta logística, mayor será la ventaja competitiva de la organización [4]. Para alcanzar dicha ventaja se deben cumplir con algunas características como plazos de entrega cortos, alto nivel de networking, buena manipulación y almacenamiento de mercancía [5].

La logística se enfoca en la responsabilidad para diseñar y administrar sistemas con el fin de controlar el movimiento y el posicionamiento geográfico de la materia prima, el trabajo en proceso y el inventario terminado al costo total más bajo [6]. En este sentido, la logística interna tiene objetivos parecidos, con la diferencia de que esos objetivos son a nivel interno de la empresa. Siendo estos objetivos la entrega de una cantidad de producto con la calidad, eficiencia y costos en el lugar y tiempo correcto. La figura 1 resume las características de la logística interna.

De acuerdo con los autores Schuh & Stich, las tareas de la logística interna se clasifican en cuatro categorías,

las cuales son almacenamiento, transporte, picking y clasificación [5].

- Almacenamiento: El almacenamiento se refiere al descanso planificado de los elementos de trabajo en el flujo de material.
- Transporte: Se refiere al movimiento de objetos dentro de un sistema, el transporte se puede dar entre diferentes lugares de producción y almacenamiento o movimiento de mercancías y personas en distancias cortas.
- Picking: Se refiere a la selección de pedidos tiene como objetivo compilar subconjuntos (artículos) de una cantidad total de productos (surtido) en función de los requisitos (pedido).
- Clasificación: Es un componente fundamental de la logística interna y consiste en el emparejamiento de unidades logísticas de una cantidad total desordenada en objetivos logísticos según criterios específicos y luego distribuyéndolos a objetivos físicos correspondientes.



Figura 1. Características de la logística interna.

El inventario es cualquier recurso almacenado que sirve para satisfacer cualquier necesidad actual o futura. Las materias primas, los productos en proceso y los bienes terminados son ejemplos de inventarios [7]. En otras palabras, el inventario es lo que una empresa, en este caso un Centro de Distribución, posee para poder surtir cualquier pedido de algún cliente, cuando este así

lo necesite, cumpliendo con las reglas generales de cantidad y calidad en el tiempo correcto y a menor costo. Llevar un inventario es importante porque permite conocer en qué situación se encuentra la misma y poder responder adecuadamente, gracias, a la información que es presentada a la dirección de la empresa. Según Bowersox, Closs & Cooper, el inventario es un activo que debe generar un retorno sobre el capital invertido, este retorno es producto de las ventas que se realizan, gracias, a mantener un inventario [6]. Además, el inventario posee 4 funciones; especialización geográfica, desacoplamiento, equilibrio en suministro/demanda y la disminución de la incertidumbre.

Los centros de distribución acumulan y consolidan los productos provenientes de varios puntos de manufactura para luego hacer un solo envío a clientes en común. Este centro de distribución podría estar ubicado de manera centralizada entre los centros de producción o entre los clientes [8]. Esto quiere decir que un centro de distribución es un edificio especializado, donde los productos almacenados son redistribuidos a otra ubicación o directamente al cliente, es impulsado por la demanda, ya que los productos entran y salen a un ritmo acelerado y siempre están ubicados en lugares de fácil acceso, cerca de autopistas, lo que permite a los camiones hacer la recolección de mercancía más rápida y eficiente. Dentro de un centro de distribución se ejecutan cuatro tareas importantes y cada una de ellas juega un rol clave para un desempeño productivo y eficiente. Estas tareas son, la recepción de mercancía, la ubicación, la preparación o “picking” y por último el proceso de expedición. El picking es uno de los procesos más importantes que se realizan en un centro de distribución, tiene que ver con la recolección de pedidos que se generan por parte de los clientes. En este punto cada producto debe ser extraído de su ubicación (la duración de este proceso dependerá de la forma en como esté distribuida la mercancía dentro de la bodega y la cantidad de recorridos que deberán ser realizados hasta obtener los productos solicitados). Una vez hayan sido recolectados, deberán ser llevados a la zona de expedición.

El análisis ABC es una herramienta de clasificación que, por lo general, se utiliza en la administración de los inventarios. Está basado en el Principio de Pareto y su función es identificar aquellos productos que representan un importe significativo y de valor global, ya sea en inventario, en ventas y/o costos. A su vez facilita la creación de categorías para designar productos y que se

les puedan dar distintos niveles y modos de control. Una optimización del inventario es importante para poder mantener los costos bajo control dentro de la cadena de abastecimiento. Sin embargo, para aprovechar al máximo, es necesario fijarse en aquellos artículos que cuestan más a la empresa [9]. La representación gráfica del análisis ABC muestra que en la categoría de artículos A, el 15% del porcentaje de artículos en inventario representa el 80% del uso anual de dinero. Los artículos B, el 30% del porcentaje de artículos en inventario representa aproximadamente entre un 15 – 25% del uso anual del dinero. Mientras que los artículos C, son el 55% del porcentaje de artículos en inventario y representan el 5% del uso anual de dinero.

La finalidad del análisis ABC es repartir los productos del inventario de una empresa en tres grupos o clasificaciones (A, B, C), para poder llevar un mejor control y está basado en el valor de los productos en el inventario general. Para poder realizar un análisis ABC, se deben seguir ciertos pasos:

- Calcular el volumen anual de dinero.
- Ordenar los artículos de manera descendente.
- Calcular el porcentaje del volumen anual en dinero (frecuencia relativa).
- Clasificar los artículos.

Luego de que los productos hayan sido clasificados, es común asignarle una letra o descripción a cada categoría, quedando de la siguiente manera: los artículos A representan aquellos productos que cuentan con un alto volumen y su rotación en inventario es rápida, los artículos B son los productos que tienen un volumen moderado y con una rotación de inventario regular y los artículos C son todos los productos que tienen un bajo volumen en el inventario y son de lenta rotación. La figura 2 muestra de manera gráfica un Análisis ABC.

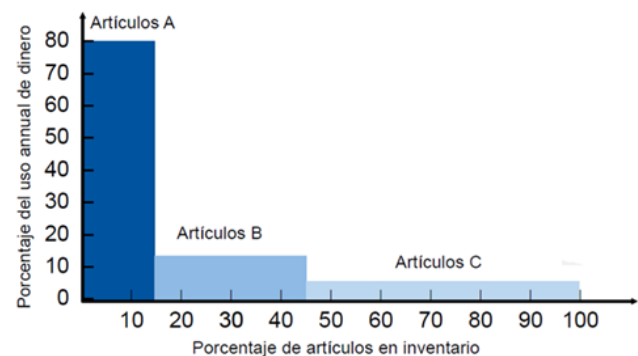


Figura 2. Representación gráfica del análisis ABC.

Luego de que los productos hayan sido clasificados, es común asignarle una letra o descripción a cada categoría, quedando de la siguiente manera: los artículos A representan aquellos productos que cuentan con un alto volumen y su rotación en inventario es rápida, los artículos B son los productos que tienen un volumen moderado y con una rotación de inventario regular y los artículos C son todos los productos que tienen un bajo volumen en el inventario y son de lenta rotación. La figura 2 muestra de manera gráfica un Análisis ABC.

El índice cúbico por pedido (COI) es una política bien conocida y aplicada con frecuencia para asignar unidades de mantenimiento de stock (SKU) a ubicaciones de almacenamiento (dedicadas) en un almacén [10]. Por lo general, el COI almacena un SKU de acuerdo con la frecuencia con la que se selecciona y por la unidad de espacio en pies cúbicos requeridos de stock. Los que son de alto movimiento o rotación se ubican más cerca de la zona de salida o preparación de pedidos. En la práctica, el almacenamiento dedicado, por lo general, está basado en la tasa de rotación o la frecuencia de selección de un SKU. Por consiguiente, los SKUs se asignan a ubicaciones basándose tanto en la popularidad como en las distancias de las ubicaciones al punto de salida o preparación de pedidos. El proceso de asignación de ubicaciones mediante el COI se realiza siguiendo pasos, tales como:

- Clasificando las ubicaciones según su distancia al punto de salida o preparación de pedidos en orden decreciente.
- Clasificando los SKU según su COI en orden decreciente.

3. Metodología

Para el desarrollo de este estudio, se estableció una metodología de trabajo constituida en fases las cuales están compuestas por una serie de pasos y procedimientos que sirven para cumplir los objetivos específicos de cada una. Esta metodología está dividida en dos fases: diagnóstico y diseño. La figura 3 resume las fases y procedimientos de la propuesta metodológica aplicada a un centro de distribución. Los resultados del caso de estudio se muestran en la siguiente sección.

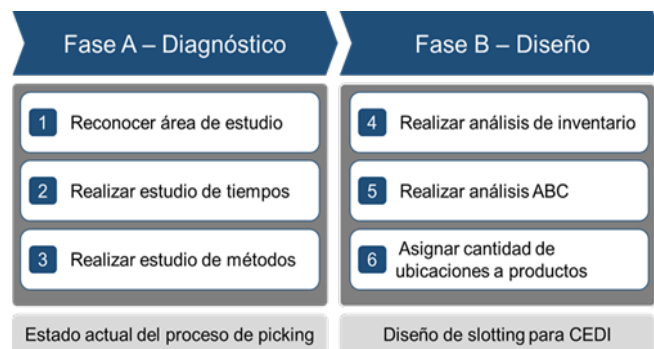


Figura 3. Estructura de la metodología.

3.1 Fase A – Diagnóstico

La primera fase de la metodología, denominada Fase A, comprende el reconocimiento del área de estudio y tiene por objetivo, diagnosticar el estado actual del proceso de picking. El primer paso en esta fase es reconocimiento del área que se va a estar estudiando, en este caso, se refiere a la bodega del centro de distribución. Para poder analizar la distribución del centro se utiliza un diagrama de distribución de planta. El segundo paso de la fase de diagnóstico es realizar un estudio de tiempos. El estudio de tiempos es un método para definir con mayor exactitud, el tiempo necesario para realizar una tarea o proceso, con base en un número limitado de observaciones. En este caso, la tarea que se medirá es el proceso de picking, con el fin de conocer cuánto tiempo toma hacer la selección de pedidos. Para realizar el estudio de tiempos se tomará como base la Tabla de la General Electric para determinar la cantidad de muestras a cronometrar. El tercer paso en la Fase A, es hacer un estudio de métodos del proceso de picking. El estudio de métodos es una técnica fundamental dentro de las ciencias del trabajo; el mismo se basa en registrar y examinar de manera sistemática la metodología que existe para realizar un trabajo u operación. Para llevar a cabo el estudio de métodos en el proceso de picking se deberá utilizar el diagrama de flujo de proceso.

3.2 Fase B – Diseño

La segunda fase de la metodología, denominada Fase B, corresponde al diseño de propuesta; en esta fase se aplican algunas de las técnicas existentes y utilizadas en la administración de inventarios descritas anteriormente y tiene por objetivo elaborar el diseño de slotting para la mercancía del centro de distribución. El primer paso de la Fase B es realizar un análisis del inventario del centro de distribución. Para este análisis es importante haber

determinado los pasillos que se tomarán en cuenta para realizar el estudio. La información por recolectar en el análisis de inventario va en función de las cantidades ordenadas por las tiendas, las cantidades despachadas por el centro de distribución y el costo unitario de los productos. El segundo paso en la Fase B corresponde a realizar un análisis ABC con la información recolectada en el análisis de inventario. El análisis ABC consiste en clasificar los productos del inventario en categorías, con el objetivo de poder llevar un mejor control de estos. Para realizar este análisis y hacer la clasificación de los artículos, se utiliza la cantidad de despachos realizados en seis meses y el costo unitario de los productos. Estos datos se extraen de la lista elaborada en el análisis de inventario de la empresa. El tercer y último paso de la Fase de Diseño consiste en determinar la cantidad de ubicaciones que requieren los productos en las estanterías, es decir, el slotting de los productos. La cantidad requerida de ubicaciones irá en función del número de días que dure en agotarse el inventario de las cajas de mercancía en el nivel de piso.

4. Resultados del caso de estudio

El caso de estudio se desarrolló en una empresa de la localidad, el Centro de Distribución de Grupo Rey localizado en el distrito de David, Panamá. Este centro de distribución cuenta con un área de almacenamiento para productos fríos y, también, se encuentran dentro de los predios, las instalaciones de Agroindustrial. Para el área de mercancía seca, según datos correspondientes al mes de julio de 2019, el centro de distribución dispone de un total de 2,478 ubicaciones, de las cuales 1,686 están ocupadas y 792 se encuentran vacías. A continuación, se detalla cada uno de los pasos de la metodología aplicados en la empresa y los resultados obtenidos.

4.1 Fase A – Diagnóstico

Paso 1 – Reconocer área de estudio

El área que se va a estudiar es la bodega de la empresa Grupo Rey. Se tomó como base el diagrama de distribución de planta suministrado por la empresa para tener conocimiento de las instalaciones. Además, tomando en cuenta la cartera de productos almacenados, se escogen tres pasillos para realizar el análisis. Los pasillos que se toman en cuenta para realizar el slotting de la mercancía, son los pasillos uno, dos y tres; ya que es en esos pasillos donde se encuentran los productos

comestibles secos. La figura 4 muestra la distribución de planta de la empresa.

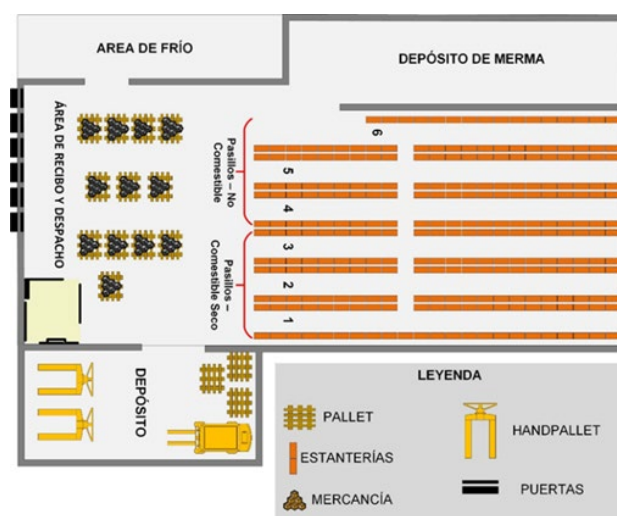


Figura 4. Distribución de planta de Centro de Distribución de Grupo Rey en el distrito de David.

Paso 2 – Realizar estudio de tiempos

El siguiente paso de la Fase de Diagnóstico es realizar un estudio de tiempos, en este caso, se hace un estudio de tiempos del proceso de picking. Para realizar este estudio, se eligió a un operador con habilidad promedio y que ya posee suficiente experiencia realizando la operación. Con apoyo de la Tabla de la General Electric, se determinó que el tiempo para realizar esta tarea oscila entre los 20 y 40 minutos. Por lo tanto, la cantidad de muestras que se deben tomar, según la tabla es de 5 muestras o ciclos. La tabla 1 presenta el resumen de las muestras obtenidas y sus tiempos en minutos.

Tabla 1. Muestras para estudio de tiempos

Muestra	Operador	Tiempo en minutos
1	J.M	29:52
2	J.M	32:03
3	J.M	52:56
4	J.M	45:00
5	J.M	58:02
Total		217:53
Promedio		43:35

Como se muestra en la tabla 1, el tiempo total fue de 217:53 minutos en los 5 días que se recolectaron las muestras y el tiempo promedio que tarda un operador en

realizar la selección de pedidos es de 43:35 minutos, el cual está dentro del rango sugerido por la tabla de la General Electric.

Paso 3 – Realizar estudio de métodos

Para comprender cómo se lleva a cabo el proceso de picking, se realizó un estudio de métodos. En este estudio se detalla paso a paso las tareas que conforman el proceso y se registran dentro de un formato de Diagrama de Flujo del Proceso. Antes de realizar el registro se descompuso en partes la operación para facilitar el diagramado. El proceso de picking en el centro de distribución se con la secuencia que se muestra en la figura 5.

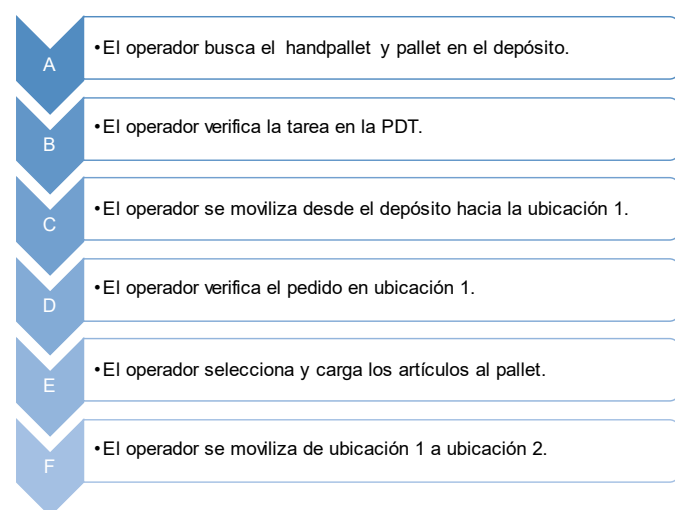


Figura 5. Operaciones del proceso de picking

El resultado obtenido en el estudio de métodos determinó que:

- El proceso de picking tuvo una duración de 22 minutos con 16 segundos.
- Se registraron 15 operaciones, ya que algunas son repetitivas a lo largo del proceso, 16 transportes producto de la movilización a lo largo de la bodega, 3 retrasos.
- Los retrasos fueron debido a fallas técnicas e inconvenientes; durante el estudio se encontró que la PDT (Portable Data Terminal) en ocasiones pierde cobertura dentro de la bodega y el operador debe esperar unos segundos para que vuelva a conectarse a la red, esto ocurrió dos veces mientras se realizaba la toma de muestras.
- Por último, se registraron 19 inspecciones, estas inspecciones son necesarias para asegurar que se seleccione la cantidad correcta del artículo correcto en la ubicación correcta.

En general, el proceso de picking en el centro de distribución se realiza de forma aceptable, con un buen tiempo; el cual puede ser mejorado corrigiendo los errores señalados y apoyándose, también, en una nueva distribución de los productos dentro de la bodega.

4.2 Fase B – Diseño

Paso 4 – Realizar análisis de inventario

Para realizar el análisis de inventario se determinó estudiar los pasillos uno, dos y tres del centro de distribución; estos pasillos son los que almacenan los productos comestibles secos. De acuerdo con los datos suministrados por la empresa, el inventario actual de productos secos es de 1,564 artículos. El análisis también recopila los precios unitarios de cada artículo con el fin de facilitar el análisis ABC. La tabla 2 presenta un extracto del análisis de inventario de los productos almacenados en el centro de distribución.

Tabla 2. Análisis de inventario para CEDI Grupo Rey

Código de artículo	Descripción de artículo	Cantidad de Despachos	Costo unitario
7452096901588	CHIRICANA UHT 3 5 EDGE 946ML	376,284	1.3
8423453905159	PRIMA CERVEZA PILSENER 330ML	646,728	0.31
27541007855	PRISTINE MIST AGUA PURIFICADA 500 ML	1,445,208	0.13
7451106200116	ARROSSISIMO ARROZ ESPECIAL 2 KG	73,250	2.55
7613032809225	IDEAL EVAPORADA 315 GR	96,048	1.04
7452096900628	CHIRICANA TRIPACK 946 ML	24,604	3.81
7451106200130	ARROSSISIMO ARROZ ESPECIAL 9 KGS 9 KG	7,074	11.49
7452096900574	CHIRICANA LE CHE UHT 6 PACK 6 UND	9,708	7.44
7451106200123	ARROSSISIMO ARROZ ESPECIAL 4.5 KGS 4.5 K	12,185	5.74
7451003710190	ARROZ PRIMERA 2000 G	46,060	1.45
7451091300082	DORADITA AZUCAR 2 KG	28,080	2.27
7451106200192	VIVARROZ ARROZ DE PRIMERA 2 KG	37,879	1.68
7451003710053	PREMIER ARROZ PRIMERA 5 LB	29,530	1.9
7451091300136	DORADITA AZUCAR 800GR	61,375	0.91
7613034466457	KLIM INST 360GR	14,928	3.42

Paso 5 – Realizar análisis ABC

Con base a la información recolectada en el análisis de inventario, se procede a realizar el análisis ABC para el CEDI de Grupo Rey. El análisis arrojó los siguientes resultados:

- La categoría A comprende 119 artículos del inventario y representan el 8% de los productos en inventario.
- La categoría B cubre 178 productos del inventario y representan el 11% de los productos en inventario.
- La categoría C es la que encierra el mayor número de productos, con un total de 1267 y representan el 81% de los artículos en inventario.

El análisis ABC determinó, como señala la figura 6, que la gran mayoría de los artículos almacenados en el

centro de distribución corresponden a productos que tienen una rotación muy baja, es decir, no son solicitados frecuentemente.

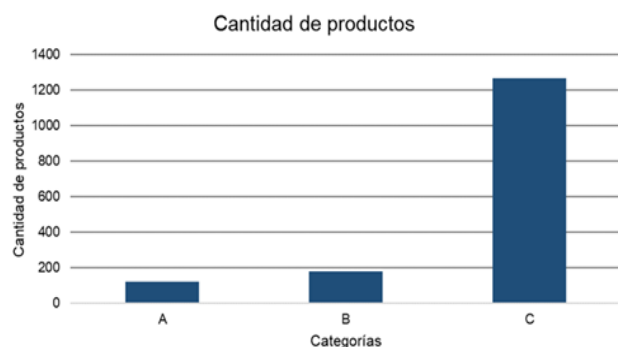


Figura 6. Representación gráfica de la cantidad de productos.

Paso 6 – Asignación de cantidad de ubicaciones

El último paso de la fase de diseño es la asignación de cantidad de ubicaciones, es decir, el slotting de los productos. Para la realización del slotting en esta metodología, se toma en cuenta la cantidad total de cajas despachadas en un periodo determinado. En este caso, el periodo es de 6 meses y la cantidad de cajas que conforman un pallet. El Centro de Distribución del Grupo Rey, en el área de comestibles secos cuenta con 2,748 ubicaciones. De las cuales el 68% corresponde a 1,686 ubicaciones ocupadas. Mientras que, el 32% restante corresponde a 792 ubicaciones vacías. El portafolio actual de productos secos que almacena el CEDI es 1,564 productos. Para realizar el slotting es necesario conocer cuántos productos cuentan con ubicaciones predefinidas y cuántos no cuentan para poder sugerir la cantidad de ubicaciones necesarias por producto. El 96% de los productos no cuentan con una ubicación predefinida debido a que no se tenía conocimiento de a qué categoría pertenecían esos productos; los mismos están almacenados, pero no contaban con un número específico de ubicaciones. El 4% restante corresponde a productos que sí tienen una cantidad predefinida de ubicaciones actualmente.

Al momento de realizar la sugerencia de cantidad de ubicaciones, se tomó en cuenta la cantidad de pallets despachados al día, bajo el principio de que el inventario de productos en piso pudiese suplir la demanda. Todos aquellos productos que logran despachar 1 pallet o más por día, se le reasignó la cantidad de ubicaciones con las que ya contaba procurando que el inventario en piso

surtiera la demanda. Si algún producto no contaba con una cantidad de ubicaciones predefinida, se le asignó la cantidad necesaria bajo el mismo principio. Los productos que no logran despachar 1 o más pallets por día, es decir, que la cantidad de pallets despachados por día es 0, se le asignó una sola ubicación siguiendo el principio del inventario en piso. Los productos que logran despachar 1 o más pallets al día son 10, lo cual representa solo el 1% del total de los artículos del inventario. El 99% restante lo conforman 1554 productos que no logran despachar 1 pallet por día. De los 10 productos que despachan más de un pallet al día, se les reasignó la cantidad de ubicaciones a 7 productos. La tabla 3 muestra un extracto de las reasignaciones de los productos.

Tabla 3. Productos con cantidad de ubicaciones reasignadas

Descripción de Artículo	Pallets x día	Ubicaciones actuales	Ubicaciones Sugeridas
CHIRICANA UHT 3 5 EDGE 946ML	3	4	6
PRIMA CERVEZA PILSENER 330ML	2	4	5
PRISTINE MIST AGUA PURIFICADA 500 ML	5	-	10
ARROSSISIMO ARROZ ESPECIAL 2 KG	1	2	3
CHIRICANA TRIPACK 946 ML	1	2	2
ARROZ PRIMERA 2000 G	1	2	2
VIVARROZ ARROZ DE PRIMERA 2 KG	1	1	2
BIG CITRUS PUNCH 3100 ML	1	2	2
PRISTINE MIST AGUA PURIFICADA 1L	1	-	2
CONTACT ENERGY DRINK 500ML	1	-	1

- Para Chiricana UHT, se sugiere un aumento del 50%, es decir, agregar 2 ubicaciones, quedando entonces con 6 ubicaciones este producto.
- Para la cerveza Prima se sugiere un aumento del 25%, que corresponde a una ubicación más, pasando de 4 ubicaciones a 5 ubicaciones.

La figura 7 muestra el incremento de ubicaciones asignados a los productos descritos previamente.

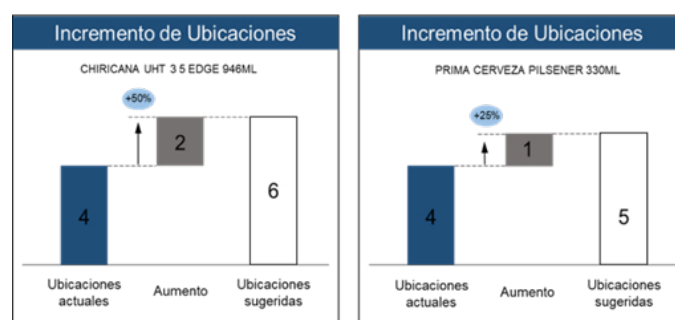


Figura 7. Incremento de ubicaciones.

La figura 8 muestra el diseño de slotting que se propone para el Centro de Distribución de Grupo Rey. El recuadro de color rojo representa a los productos A y se

propone que la distribución sea en la parte frontal de los pasillos 1 y 2 ya que son los que poseen alta rotación. Los productos B están representados por el recuadro de color amarillo, estos están distribuidos en la parte media de los pasillos 1 y 2. Por último, el recuadro de color verde representa a los productos C, se sugiere que estos productos estén ubicados en lo que resta de la parte trasera de los pasillos 1 y 2 y los demás que se ubiquen en el pasillo 3 por completo. Este diseño está propuesto para el tipo de recorrido que se hace para realizar el picking, el cual es en forma de U.

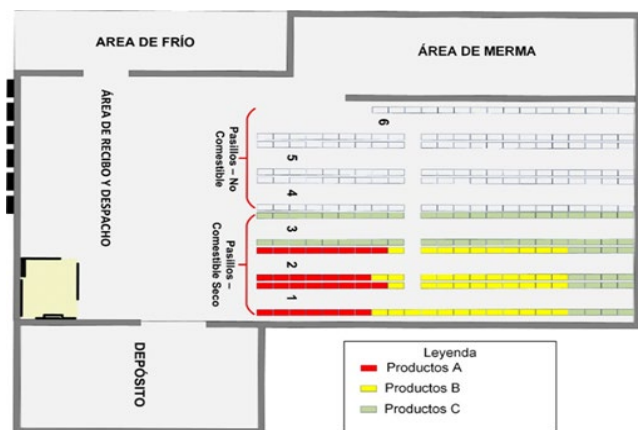


Figura 8. Diseño de slotting propuesto para CEDI Grupo Rey.

5. Conclusiones

Esta investigación propone una metodología para el diseño de slotting de mercancía en centros de distribución. Para comprender dicho desarrollo, se definieron algunas teorías y conceptos básicos. Se definió el concepto de logística interna y su función dentro de un centro de distribución, para luego explicar el concepto de inventario, su función y los tipos que existen, por último, se describen los procesos que ocurren, generalmente, en un centro de distribución, como almacenamiento, picking, despacho de mercancía, entre otros. Esta propuesta de metodología se encuentra dividida en dos fases y cada fase está compuesta por tres pasos. La primera fase corresponde a la fase de diagnóstico y comienza por hacer un reconocimiento del área de estudio. El objetivo principal en esta fase fue obtener el diagnóstico actual del proceso de picking. Se concluye que, el proceso de picking es desarrollado de manera aceptable y en el estudio se notaron pocos errores, los cuales, aunque son generadores por atrasos, pueden ser corregidos por la administración mediante la

implementación de equipos tecnológicos y charlas a los operadores para minimizar en lo posible estos errores. La segunda fase de la metodología corresponde a la fase de diseño. Esta fase comienza con el desarrollo de un análisis de inventario para conocer el portafolio de productos con los que se estará trabajando y un componente clave para este análisis fueron los precios unitarios de cada producto. El objetivo de esta fase fue proponer el diseño de slotting para el CEDI de Grupo Rey, para el cual se aplicó un análisis ABC. Una vez realizado el análisis ABC se procedió a determinar la cantidad de ubicaciones por categoría que requieren los productos con base en la cantidad de ubicaciones que se cuentan para los productos comestibles secos y con la cantidad de ubicaciones predefinidas con las que algunos productos ya contaban. Al asignar la cantidad de ubicaciones se tomó en cuenta que cada producto debe tener suficiente inventario en las ubicaciones de piso para suplir la demanda en días y los 1,564 productos del portafolio ahora cuentan con sus respectivas ubicaciones y organizados por categoría. Debido a que la metodología se basa en fundamentos teóricos, la misma debe validarse y compararse con otras para poder determinar su practicabilidad, así como su viabilidad. Un último paso sería la implementación del modelo propuesto. Se debe realizar más investigación práctica aplicando la metodología en diferentes centros de distribución para evaluar su efectividad y beneficios.

REFERENCIAS

- [1] T. Rian, «Internal Logistics as a Part of Supply Chain, Case: Nokia-China, Dongguang Branch,» China, 2009.
- [2] J. L. Palenzuela, «Los 10 problemas más comunes en la gestión del almacén para las pymes,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.cadenadesuministro.es/noticias/los-10-problemas-mas-comunes-en-la-gestion-del-almacen-para-las-pymes/>.
- [3] O. Pinheiro De Lima, S. Breval, C. M. Rodriguez y N. Follmann, «Una nueva definición de Logística Interna y formas de evaluar la misma,» 2017.
- [4] C. Juan, «Las funciones más importantes en la gestión de la logística interna,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.iebschool.com/blog/funciones-gestion-interna-logistica/>.
- [5] G. Schuh y V. Stich, Logistik-management, Germany: Springer - Verlag, 2012.
- [6] D. Bowersox, D. Closs y M. B. Cooper, Administración y logística en la cadena de suministro, McGraw - Hill, 2007.

- [7] B. Render, R. M. Stair y M. E. Hanna, *Metodos Cuantitativos para los Negocios*, Undécima ed., México: Pearson Educación, 2012.
- [8] E. H. Frazelle y R. Sojo, *Logística de almacenamiento y manejo de materiales de clase mundial*, Norma, 2002.
- [9] J. Collignon y J. Vermorel, «Análisis ABC (Inventario),» 2012. [En línea]. Available: [https://www.lokad.com/es/definicion-analisis-abc-\(inventario\)](https://www.lokad.com/es/definicion-analisis-abc-(inventario)).
- [10] P. C. Schuur, «THE CUBE PER ORDER INDEX SLOTTING STRATEGY, HOW BAD CAN IT BE? » Department of Industrial Engineering and Business Information Systems, University of Twente, The Netherlands, 2014.

Ubicación óptima de sistemas de almacenamiento de energía en redes eléctricas de distribución georreferenciadas

Optimal location of energy storage systems in georeferenced power distribution system

Jorge Paúl Muñoz ^{1*}, Miguel Campaña ²

¹ Carrera de Ingeniería Eléctrica - Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

² Grupo de Investigación GIREI, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

*Autor de correspondencia: jmunoz@ups.edu.ec

RESUMEN— En la actualidad, el sector energético global está ligado a políticas ambientales bajas en carbono y eficiente uso de la energía con el desarrollo de nuevas tecnologías; es así que, la generación distribuida y sistemas de almacenamiento han ganado relevancia y se han integrado a la red eléctrica. El presente artículo propone una heurística para ubicar sistemas de almacenamiento de energía (SAE) asociados a generación distribuida en redes eléctricas georreferenciadas; la principal contribución y objetivo de la investigación radica en utilizar las características intrínsecas de la red como sus distancias, geolocalización de usuarios y sitios candidatos para instalar SAE que permiten minimizar caídas de voltaje y pérdidas de potencia. El problema de optimización se resuelve utilizando el algoritmo de búsqueda exhaustiva (*Brute Force*) y se valida en un escenario de la ciudad de Pamplona - España. Adicionalmente, se detallan las diferentes tecnologías de SAE y ventajas técnicas que están brindan a las redes eléctricas; así como diferentes métodos relacionados al dimensionamiento y emplazamiento de estos sistemas.

Palabras clave— Generación distribuida, Planificación de almacenamiento de energía, Optimización heurística, Ubicación óptima georreferenciada, Red de distribución de energía.

ABSTRACT— Recently, the global energy sector is linked to low carbon environmental policies and efficient use of energy with the development of new technologies. Distributed generation and energy storage systems (ESS) have gained relevance and they have integrated into the grid. This paper proposes a heuristic to placement EES associated with distributed generation in georeferenced power distribution system; The major contribution and objective of the study is based on the use of grid's intrinsic characteristics such as: distances, geolocation of users and candidate sites to install EES that allow minimizing voltage drops and power losses. The optimization problem is solved using the Brute Force algorithms and is validated in a scenario of Pamplona city, Spain. Additionally, the different SAE technologies and technical advantages that are provided to the electric networks are detailed; as well as different methods related to the sizing and placement of these systems.

Keywords— Distributed power generation, Energy storage planning, Heuristic optimization, Optimal georeferenced siting, Power distribution system.

1. Introducción

El desarrollo de las actividades económicas y productivas de las sociedades a través de las últimas décadas, así como, el avance tecnológico a nivel industrial, economías de escala y crecimiento demográfico, presente en los países, hacen que sean necesarios cada vez mayores requerimientos energéticos; la principal problemática del modelo económico adoptado por las naciones está relacionado al uso de

recursos naturales de origen fósil y no renovable como el petróleo que con el paso de los años ha presentado consecuencias a nivel ambiental [1].

Entidades como la Organización de Naciones Unidas (ONU) y Unión Europea (UE) han mostrado su preocupación sobre esta temática a través del establecimiento de acuerdos (COP21 y Acuerdo de París 2019), protocolos y mecanismos para reducir la emisión de gases de efecto invernadero, así como, el

Citación: J. Muñoz y M. Campaña, "Optimal location of energy storage systems in georeferenced power distribution system" *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 2, pp. (), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 29 de febrero de 2020. **Recibido con correcciones:** 19 de julio de 2021. **Aceptado:** 19 de julio de 2021.

DOI.

Copyright: 2021 J. Muñoz y M. Campaña. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

planteamiento de metas para garantizar la conservación de los recursos para las actuales y especialmente las futuras generaciones (Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS) [2]. El sector energético, según la ONU, es uno de los factores que contribuye al cambio climático y representa el 60% de todas las emisiones globales de gases de efecto invernadero debido al crecimiento de las ciudades y especialmente, el consumo doméstico y comercial de energía que después del sector transporte, es la segunda área de uso de energía que más rápidamente ha crecido en la última década por la falta del uso eficiente de los recursos. Fundamentados en la problemática anterior; para el año 2030, los ODS 7, 11 y 12, plantean metas que permitan garantizar el acceso a la energía, haciendo un uso eficiente de la misma y basada en una producción y consumo racional de los recursos, permitirán a futuro planificar ciudades y comunidades inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles [3]–[6].

Actualmente, la rápida urbanización y crecimiento de las urbes, deben responder a criterios de planificación sobre los recursos energéticos, la generación eléctrica de forma concentrada o distribuida con recursos renovables y no convencionales como la energía solar fotovoltaica, eólica y biocombustibles, así también, los sistemas de almacenamiento de energía, son las opciones más viables para impulsar los ODS y la economía de un país al diversificar su matriz energética [7], [8].

Las redes eléctricas a futuro, están direccionándose a ser más gestionables (Smart Grid) con el avance en tecnologías de medición, control y comunicación conjuntamente con generación distribuida y sistemas de almacenamiento de energía (SAE); la ubicación de estos últimos, deben responder a criterios técnicos y económicos que permitan encontrar la localización adecuada y aprovechar las ventajas técnicas que añaden a una red; entre estas se destacan la flexibilidad y seguridad que le da a la red de distribución como soporte para gestionar la demanda, por ejemplo, en países donde se tienen dos pagos por el servicio de energía eléctrica (demanda y potencia punta) los SAE reducen estos rubros, reducción de la demanda punta y generación convencional ya que pueden guardar energía en periodos donde la demanda es baja y luego usar lo almacenado durante periodos con incremento de demanda [9]–[11].

Adicionalmente, es importante destacar que los SAE permiten mejorar la calidad de servicio suavizando fluctuaciones cortas causadas por cambios de carga o pequeñas interrupciones, en el caso de indisponibilidad de una unidad de generación o líneas de transmisión, los SAE pueden actuar como una fuente que proporciona

energía a la red para evitar interrupciones. Así también, permite integrar a la red los sistemas de generación de energía eléctrica con recurso no renovables como la radiación solar y el viento que su principal desventaja es la intermitencia y nulo control que se tiene sobre los mismos, haciéndolos más gestionables y rentables [12]–[15]. La ubicación de SAE debe responder a criterios técnicos y económicos que permitan tomar la mejor opción de localización dentro de una red, uno de estos criterios es la minimización de pérdidas de potencia y caída de voltaje desde el punto en el cual está colocado el SAE hasta los usuarios; con mayor detalle, se mencionan en la sección III algunos criterios considerados en otras investigaciones sobre la temática [16].

El presente artículo busca desplegar sistemas de almacenamiento de energía SAE asociado a generación distribuida minimizando la caída de voltaje y pérdidas de potencia en una red de distribución georreferenciada.

Este artículo se organiza de la siguiente manera. La sección II presenta un detalle de las principales características de SAE y los más empleados en redes eléctricas. La sección III se describe una revisión de las investigaciones existentes sobre la temática. En la sección IV se traza el problema y su planteamiento matemático y los resultados obtenidos del modelo se los analizan en la sección V y finalmente, en la sección VI se presentan algunas conclusiones producto de la investigación y futuros trabajos.

2. Tecnologías de almacenamiento en redes eléctricas

Existen varias tecnologías de SAE en redes de energía eléctrica, entre ellas se incluye a las centrales de bombeo hidráulico, aire comprimido, hidrógeno, volantes de inercia, almacenamiento magnético con superconducción, supercondensadores o ultracondensadores y baterías de estado sólido; estas tecnologías son muy populares y se utilizan para diversas aplicaciones en los sistemas de energía dependiendo del nivel de potencia o densidad de energía que se requiera [17], [18]. En sistemas de distribución, micro-redes y sistemas de generación autónomos (solar o eólico) la utilización de SAE configurados con bancos de baterías (BESS del inglés *Battery Energy Storage System*) es la opción más frecuente y viable en función de los costos y madurez de la tecnología [19] como se destaca en la Figura 1

Actualmente, en el mercado se encuentran diferentes tecnologías de BESS como: baterías de ion-litio, sulfuro de sodio, plomo ácido y baterías de gel y su aplicación depende de las características en cuanto a tiempo de operación, rendimiento, ciclos de carga-descarga y mantenimiento [20]. Las más utilizadas han sido las de

plomo ácido e Ion-litio; estas últimas trabajan en periodos más extensos ya que tienen más ciclos de carga-descarga, sin embargo, las baterías de plomo ácido son más utilizadas en sistemas aislados de red por la madurez de la tecnología y costos competitivos en el mercado [21].

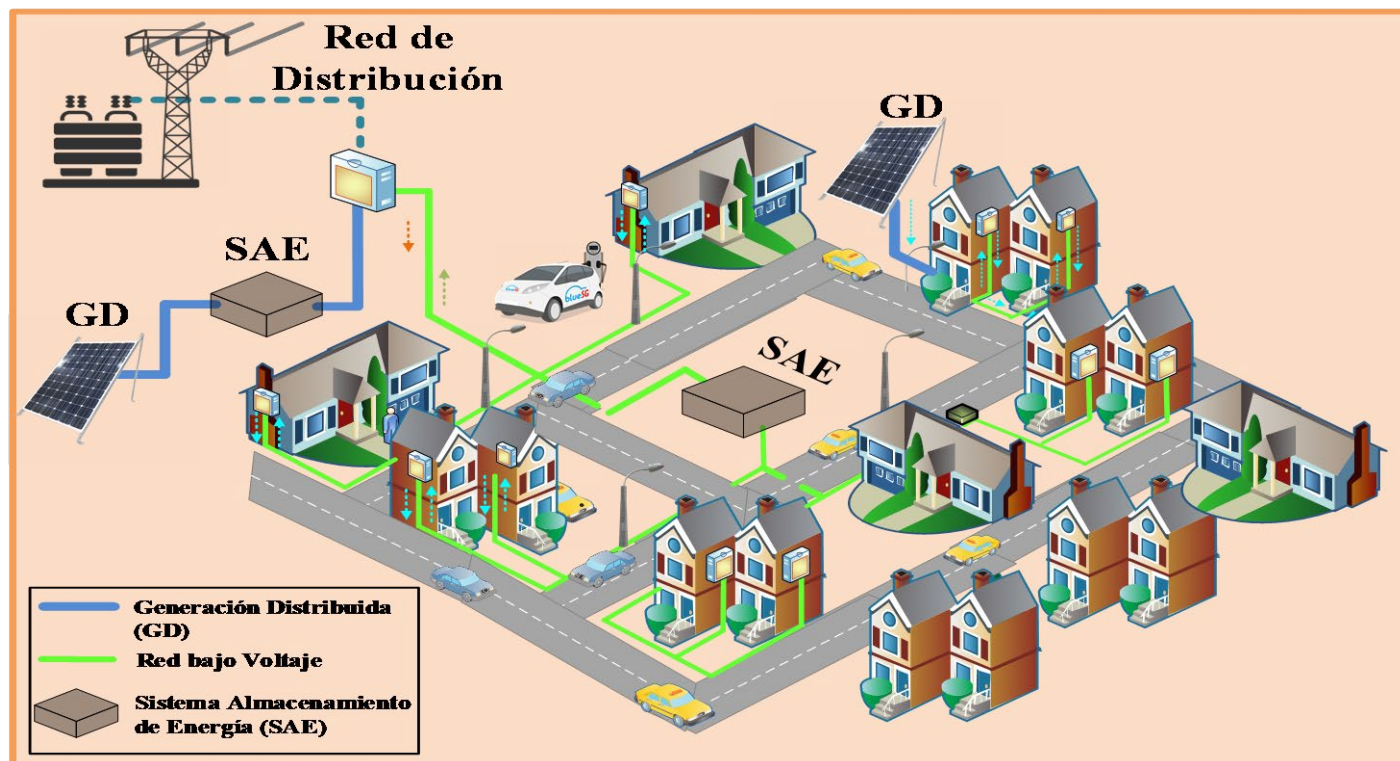


Figura 1. Sistema de distribución con localización georreferenciada de sistemas de almacenamiento. Fuente Autor.

3. Planificación y ubicación de sistemas de almacenamiento de energía sae en redes eléctricas

La revisión del estado del arte da cuenta que la localización y dimensionamiento de los SAE responde a criterios de optimización de una o varias variables que intervienen en el sistema, entre estas se analiza parámetros técnicos como perfiles y regulación de voltaje, reducción de pérdidas en la red, impedancia de la red (relación R/X), factor de carga, ciclo de vida de los SAE, repuesta a la demanda, así como criterios económicos con el costo anual, el valor presente neto del sistema, su costo nivelado de energía (LCOE) y el costo del ciclo de vida, son algunas de las formas efectivas de reducir los costos y justificar los altos costos de inversión de estos elementos [22]. Entre las técnicas más utilizadas se tiene Algoritmos de optimización de enjambre de

partículas (PSO), Algoritmo evolutivo de optimización de enjambre de partículas (E-PSO), Algoritmo genético (GA) aleatorio, Algoritmo de colonia de abejas artificiales (ABC), Modelo de programación lineal (LP) Modelo de programación lineal de enteros mixtos (MILP), simulación del Monte Carlo, agrupación y análisis de sensibilidad [23]–[25].

A continuación, se destacan artículos relacionados con el dimensionado y ubicación de los SAE en redes eléctricas mencionando las variables que intervienen y los principales aportes a la temática en análisis.

En [26], se analiza la incorporación de SAE conjuntamente con la demanda de edificios y vehículos eléctricos a los cuales los considera como una demanda flexible y gestionable, el modelo lo resuelven con programación Lineal Entera mixta (MILP) aplicada a un escenario en Finlandia que da como resultado el ahorro

en la facturación de los usuarios y una reducción del consumo.

En [27] se presenta un modelo de participación en el mercado diario y en tiempo real de una planta virtual de energía (VPP del inglés *Virtual Power Plant*) formada por generación no convencional y sistemas de almacenamiento de energía para maximizar las ganancias y participación en el mercado de la VPP, el modelo ubica las VPP estratégicamente utilizando optimización difusa por la aleatoriedad del recurso.

En [23] se propone la integración de SAE en un sistema comunitario residencial con generación fotovoltaica, la ubicación de los mismos se realiza minimizando las pérdidas anuales de energía considerando el criterio de centro de gravedad y un despacho por hora para lograr un factor de carga anual deseado, el modelo se prueba en un sistema de 19 buses y observando la reducción del costo anual de energía comprada, pérdidas de potencia en la red y mejorando el factor de carga.

En [28] se busca la capacidad y ubicación de los SAE en redes de distribución con alta inmersión de energía solar con el objetivo de mejorar la regulación de voltaje la red considerando la matriz de impedancias del sistema y la relación R/X de la red, optimizando la cantidad de potencia activa y reactiva intercambiada por el SAE y la red.

La principal contribución de [29] son estrategias para el control de potencia y gestión de energía en una microrred reduciendo la energía generada y las pérdidas de mejorando así la eficiencia de todo el sistema minimizando los costos operativos. Considera un algoritmo evolutivo para controlar los componentes de la microrred y almacenamiento de energía.

En [30] se propone un método de optimización de ubicación y dimensionamiento del BESS en función de la respuesta a la demanda considerando costos asociados al ciclo de vida, los ingresos por desplazamiento de carga y la disminución de pérdidas mediante algoritmo genético.

Es necesario mencionar que de los artículos revisados ninguno incluye criterios de georreferenciación como una de las variables adicionales para ubicación de los SAE en redes eléctricas.

4. Metodología y formulación del problema

El presente artículo es de categoría básica debido a su naturaleza experimental empleando procesos de

simulación. Tiene un enfoque cuantitativo, puesto que, se busca determinar la ubicación óptima de SAE además minimizar la variación de voltaje desde el nodo de conexión hasta el primario del transformador de distribución más alejado. Para ello el modelo propone una metodología exploratoria, basado en búsqueda exhaustiva, en la cual, se aplica procesos iterativos para determinar la topología factible a implementar en el caso real de estudio. En el presente artículo, se ha utilizado como escenario la localidad de Pamplona, España con un área de estudio aproximado de 1.33 km^2 .

La metodología propuesta advierte la necesidad de generar un algoritmo iterativo sujeto a condiciones iniciales mediante la observación de restricciones reales en cada caso de estudio tales como, número de segmentaciones, calibre del conductor, y demanda en kVA aleatoria bajo distribución normalizada.

Tabla 1. Notaciones y Variables

Nomenclatura	Descripción
β	Coordenadas de intersecciones.
α	Coordenadas de transformadores.
$A_{(n)}$	Area de estudio
ζ	Vector unión de intersecciones y transformadores.
ξ	Vector usuarios por cada grupo.
kVA_km	Vector de potencia soportada por el conductor por cada kilómetro.
δ	Data georreferenciada del área de estudio
γ	Matriz de conectividad
G	Matriz de distancias en (km)
Go	Matriz auxiliar de distancias (km)
rows	Variable extraer filas ID de Y
col	Variable extraer columna ID de Y
ϕ	Indices de topología sobre calles
σ	Indices de transformadores
ψ	# clústeres
Idx	Indices de cada agrupación
mdxy	Centro de masa de cada clúster
ρ	Posición óptima de generación distribuida
TR	Ruta de ρ hacia α de cada clúster
D	Distancia total de cada clúster
matriz	Trazabilidad red primaria de ρ hacia cada α
trayectoria	Topología de potencias nodales de la red primaria
Δd	Variable de distancia

ΔV	Variable de caída de voltaje en %
C	Costo por cada Kilómetro de conductor

El presente artículo pretende determinar el lugar óptimo para emplazar SAE como alternativa para mejorar los perfiles de voltaje logrando proveer a la demanda de la potencia requerida garantizando continuidad de servicio eléctrico. El lugar seleccionado por la heurística para emplazar SAE estará determinado por el centro de masa del conjunto de transformadores pertenecientes a cada clúster. Una vez emplazado SAE se procede a determinar, mediante un proceso exploratorio, la ruta óptima para poder energizar los primarios de los transformadores de distribución que sirven a los usuarios finales.

Al ser la mínima ruta de expansión desde SAE hacia los primarios de los transformadores de distribución aquella topología garantizará reducir la variación de voltaje permitiéndonos reducir el calibre del conductor para transferir la máxima potencia a los usuarios finales, por lo tanto, la presente investigación no solo permitirá planificar el emplazamiento de SAE, sino que además permitirá minimizar y evaluar la variación de voltaje permitiendo al usuario de la heurística propuesta, tomar decisiones confiables.

Existe n transformadores de distribución (α) distribuidos en un área georreferenciada A , $A(n)$. El modelo conoce la topología del área de estudio δ y con ello las intersecciones β definidas en una matriz de conectividad γ , las cuales, permitirá mediante un árbol de mínima expansión determinar la mínima ruta que permitirá relacionar los primarios de los transformadores de distribución con SAE. Al agrupar transformadores de distribución considerando su cercanía se consigue brindar servicio a un grupo de usuarios ξ , tal que, permita minimizar la longitud total del conductor que energizará los primarios de los transformadores de distribución desde SAE. Con el algoritmo 1 óptimo despliegue de sistemas de acumulación de energía (ODSAE) se expone la metodología para el emplazamiento de SAE, enrutamiento y verificación de variables de interés como i) variación de voltaje y ii) distancias acumuladas de cada sistema radial encontrado por el modelo. El número de sistemas radiales existentes en el área de estudio dependerá de ψ quienes a su vez deberán ser definidos por el evaluador indicando el número de usuarios aproximados deseado por cada agrupación, es decir, si de 32 transformadores de distribución emplazados desea

agrupar en 8 usuarios aproximadamente por cada clúster se debe determinar el cociente entre el número de transformadores distribuidos y el número de usuarios por grupo. En la Tabla 1 se expone un sumario indicando la definición de cada variable empleada en el presente artículo.

Algoritmo 1 ODSAE – Optimo Despliegue SAE.

Paso 1: Variables

$$\zeta = [\beta \ \alpha]$$

Paso 2: Leer OSM

$$\delta = \text{openstreetmap}('belosa.osm')$$

Paso 3: Matriz de Conectividad

$$Y = \text{extraer_matriz}(\delta)$$

$$G = \text{zeros}(\text{longitud}(\gamma))$$

For $i \leftarrow \text{longitud}(\gamma)$

For $j \leftarrow \text{longitud}(\gamma)$

$$G(i,j) = \text{haversine}(\gamma_i, \gamma_j) * \gamma_{i,j}$$

$$G(j,i) = \text{haversine}(\gamma_j, \gamma_i) * \gamma_{j,i}$$

Endfor

Endfor

$$Go \leftarrow G$$

Paso 4: Agrupación Transformadores

$$\text{rows} \leftarrow \text{any}(\gamma, 2); \text{col} \leftarrow \text{any}(\gamma, 1)$$

$$\text{índices} \leftarrow \text{rows.'} \mid \text{col}$$

$$\phi = \text{encontrar}(\text{índices} == 1)$$

$$\sigma = \phi(1:1:\text{longitud}(\beta))$$

$$\psi = \text{redondear}(\text{longitud}(\alpha) / \xi)$$

$$[\text{Idx} \ \text{mdxy}] = \text{kmedoids}([\zeta_{\sigma i}, \zeta_{\sigma j}], \psi)$$

$$\rho = \alpha(\text{mdxy})$$

Paso 5: Ruta Óptima Red Primaria 6.3 kV

For $k \leftarrow \text{longitud}(\gamma)$

$$\text{inicio} \leftarrow \rho(k)$$

$$\text{final} \leftarrow \alpha(\text{encontrar}(\text{Idx} == k))$$

$$[\text{TR} \ \text{D}] =$$

$$\text{shortestpathtree}(\text{Go}, \text{inicio}, \text{final})$$

For $l \leftarrow \text{longitud}(\text{TR})$

$$\text{temp} = \text{TR}\{l\}$$

For $h \leftarrow \text{longitud}(\text{temp})$

$$\text{matriz}(f, h) = \text{temp}(h)$$

Endfor

Endfor

$$\text{rows} = \text{any}(\text{matriz}, 2); \text{col} = \text{any}(\text{matriz}, 1)$$

$$\text{índices} = \text{rows.'} \mid \text{col}$$

$$\min \sum_{i,j}^{\alpha} \Delta V_{ij} * C + \min \sum_{i,j}^{\alpha} \Delta d_{ij} * C \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\alpha_{ij} \in A_{(\rho)}, \forall \rho \in \mathbb{R}^+ \neq 0 \quad (2)$$

$$\xi \in A_{(\rho)}, \forall \xi \in \mathbb{R}^+ \geq 1 \quad (3)$$

$$\gamma \in A(\beta, \alpha), \gamma(\beta, \alpha) \in \gamma_{n \times n} \quad (4)$$

$$\Psi \geq 1, \forall \Psi \in \mathbb{R}^+ \text{ enteros} \quad (5)$$

$$\Delta d \geq 1, \in \Delta V\% \neq 0, \forall \Delta d \in \mathbb{R}^+ \neq 0 \quad (6)$$

$$d = 2R \sin \sqrt{\sin^2 \left(\frac{\Delta lat}{2} \right) + \cos(lat1) \cos(lat2) + \sin^2 \left(\frac{\Delta lon}{2} \right)} \quad (7)$$

trayectoria(k) = γ (índices)

Endfor

Paso 6: Computo Caída de Voltaje

For m $\leftarrow$ 1: longitud (trayectoria)

Δd = encontrar (Go(trayectoria(m)))

$\Delta V(m) \leftarrow$ (trayectoria(m)* Δd) / kVA_km

Endfor

Paso 7: Tabular Información

La ecuación 1 representa la función objetivo, misma que, expresa minimizar la caída de voltaje y la reducción en km de la longitud total del conductor en la red primaria de distribución. Con la ecuación 2 se garantiza la nulidad de una coordenada en latitud y longitud, además, verifica la pertenencia de dicha coordenada al área de estudio. En la ecuación 3 se verifica que al menos exista un clúster de tal manera que se pueda dar paso a la creación de la red primaria de los transformadores de distribución. Las matrices de conectividad generadas en el modelo deben ser $n \times n$, es decir cuadrada, con la ecuación 4 se verifica lo expuesto. Para dar origen a una agrupación se debe garantizar que el cociente entre el número de usuarios y el número deseado aproximado de transformadores de distribución por grupo se un valor entero con la ecuación 5 se puede verificar. Con la ecuación 6 se expone que necesariamente debe existir una longitud diferente de cero para que existe caída de voltaje.

5. Análisis de resultados

En esta sección se presenta la discusión de los resultados obtenidos en los procesos de simulación durante la evaluación del modelo. El modelo es finito y aplicable a diferentes escenarios debido a su flexibilidad para adaptarse a nuevas condiciones. Con la tabla 2 se expone los parámetros de simulación con los que fue evaluado y validado la heurística propuesta. En la figura 1 se presenta el escenario inicial en el cual se desarrolla la evaluación del modelo propuesto en el presente artículo. Con la figura, se evidencia que el modelo necesariamente debe conocer la topología, el área geográfica y las relaciones nodales que existe mediante su matriz de conectividad.

Tabla 2. Óptima ubicación y dimensionamiento de generación distribuida y SAE.

Despliegue	Transformadores de distribución	32 unidades
	Área de Estudio	1.133 km ²
	Área geográfica	Urbano
	Ubicación de GD	Georreferenciado
Aplicación	Usuarios	Variable
	Demanda	Variable
	Tipo de Red	AC
	Nivel de Voltaje	6.8 kV

Además, en la figura 1 se puede apreciar que las trayectorias consideradas en el modelo son bidireccionales, de tal manera que, el modelo pueda elegir la mejor ruta en cada caso de estudio con el mayor número de opciones posibles; las líneas de color azul con sus respectivos pesos indican la dirección y longitud en kilómetros de la trazabilidad de la ruta. El escenario seleccionado es un área ubicada en España en la localidad de Belosa en la ciudad de Pamplona-Navarra.



Figura 1. Relación a nivel de trayectorias geolocalizadas y exposición gráfica de matriz de conectividad. Fuente Autores.

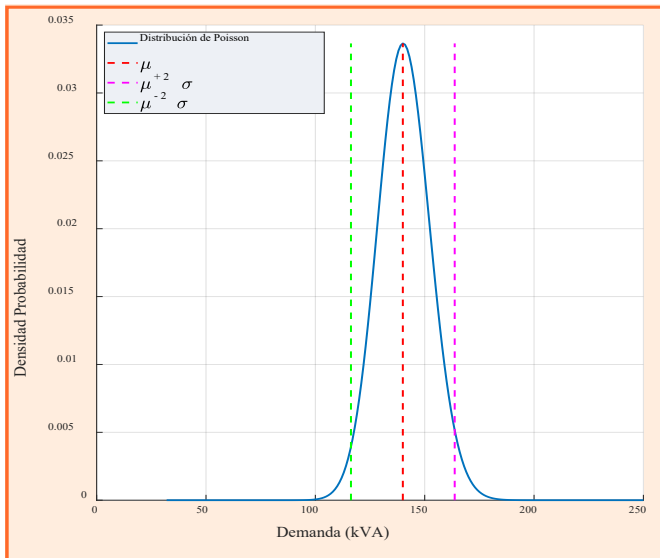


Figura 2. Asignación randómica de la demanda bajo distribución de Poisson. Fuente Autores.

La figura 2 ilustra la demanda emplazada en los transformadores de distribución. Es importante mencionar que esta demanda puede ser ajustada de manera arbitraria para cada escenario real en el que se desee evaluar al modelo. Los valores de potencia asignado a cada transformador oscilan entre 110 y 160kVA. Esta carga permitirá determinar la magnitud de caída de voltaje y en consecuencia permitirá dimensionar el conductor a emplearse en función de la variación de voltaje.

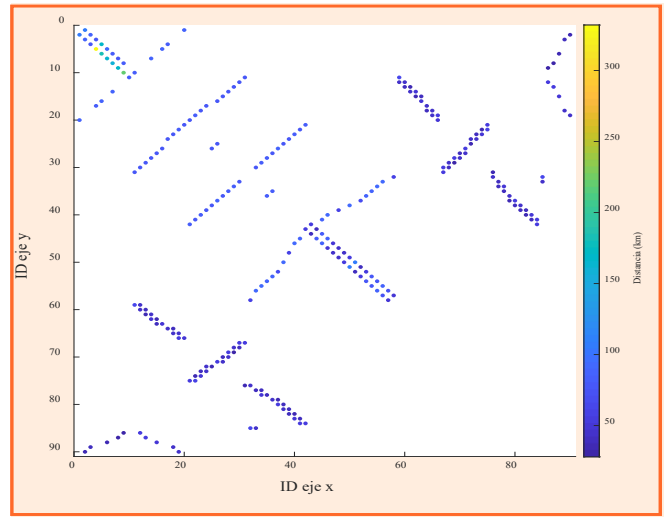


Figura 3. Matriz de adyacencia o de conectividad. Fuente Autores.

En la Figura 3 se expone la matriz de conectividad, la cual, revela la longitud existente entre cada nodo del escenario, además, podemos apreciar cómo se relacionan las intersecciones entre sí, es decir, la topología alcanzada como resultados necesariamente debe ajustarse a las trayectorias habilitadas en la figura 3. Otro detalle que se ilustra la figura 3 es la bidireccionalidad del trazado de las rutas y se verifica con la diagonal, puesto que, el lado superior es simétrico al inferior.

Tabla 3. Planeación de SAE

Max. # Usuarios	Cluster/Trafos	Conductor km	Potencia MVA
2	2	0.10	0.35
	2	0.09	0.42
	2	0.16	0.21
	3	0.24	0.29
	2	0.16	0.40
	1	0.00	0.16
	1	0.00	0.09
	2	0.19	0.29
	2	0.08	0.31
	2	0.15	0.30
	3	0.19	0.48
	2	0.17	0.12
	1	0.00	0.06
	4	0.38	0.53
	1	0.00	0.23
	2	0.09	0.27
4	4	0.32	0.52

	3	0.20	0.48
	4	0.38	0.53
	3	0.26	0.29
	4	0.34	0.62
	5	0.36	0.83
	5	0.56	0.77
	4	0.55	0.46
8	9	1.16	1.13
	10	1.47	1.57
	9	1.35	1.34
	4	0.55	0.44
16	14	2.33	2.02
	18	3.21	2.48
32	32	9.85	4.50

Con la tabla 3 se expone los resultados de la planeación bajo diferentes condiciones iniciales. En la columna 1 se considera el número de usuarios promedio requerido para definir las segmentaciones en que se dividirá el área de estudio. El número de SAE a emplazar dependerá el número de segmentaciones encontradas por el modelo. En consecuencia, la demanda que deberá satisfacer SAE es la sumatoria de las potencias parciales de los transformadores de distribución emplazados en el área de estudio. En la columna 2 se expone el número de transformadores de distribución pertenecientes a un mismo circuito y la longitud del vector de la columna 2 expresa el número de agrupaciones encontrada por el modelo. Es notorio apreciar, que a al aumentar la capacidad de agrupar transformadores el número de clústeres disminuye. Otro detalle que se desvela en la tabla 3 es la reducción de los clústeres cuando aumenta la potencia instalada requerida por cada SAE. En las columnas 3 y 4 de la tabla 3 se presenta la distancia total del conductor y potencia total requerida en cada agrupación. Por ejemplo, si nos ubicamos en la columna 2, fila 1 indica que existe 2 transformadores en esa agrupación y la longitud total del conductor a emplear es de 100 metros (columna 3, fila 1) y la potencia para satisfacer la demanda es de 350MVA (columna 4, fila 1). De manera similar se puede interpretar la Tabla 3 para todos los casos ensayados. Por lo tanto, el modelo ha demostrado ser práctico y confiable en cuanto a los resultados obtenidos y queda demostrada la funcionalidad de la heurística propuesta en esta investigación. La metodología aplicada para determinar

la variación de voltaje en el presente artículo se basa en el método de administración de electrificación rural con sus siglas en inglés REA. Este método permite estimar la demanda en función del número de usuarios asociados a los secundarios de los transformadores de distribución.

Es importante mencionar que cada método de cómputo para determinar la variación de voltaje puede ser ajustado a las diferentes realidades en las que se pretenda aplicar la metodología propuesta en el presente artículo. Con la figura 4 se ilustra la magnitud de variación de voltaje en función del calibre del conductor por cada clúster. Los kVA/m seleccionados para evaluar al modelo corresponde para redes de calibre 4, 2, 1/0, 2/0, 3/0 y 4/0 correspondiente a la leyenda de la Figura 4 de menor a mayor.

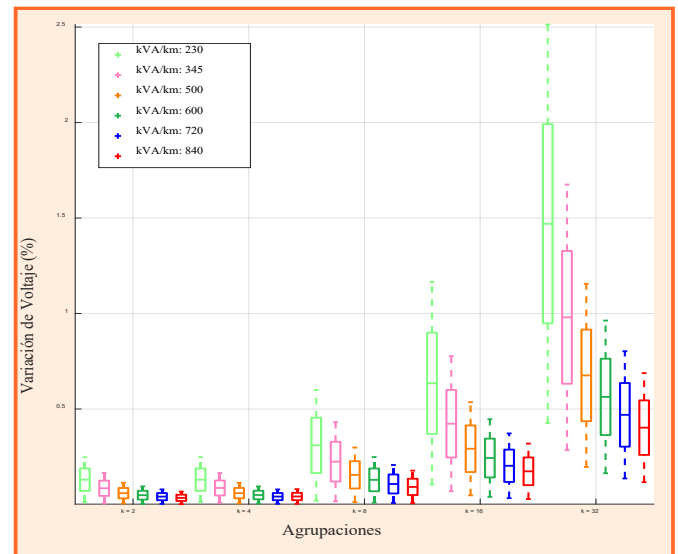


Figura 4. Variación de voltaje en función del calibre del conductor. Fuente Autores.

Por lo tanto, en la figura 4 se pueden apreciar 5 agrupaciones para un valor de k diferente en cada caso.

El valor de k representa el número de transformadores promedio a agrupar en cada clúster. Cuando k incrementa como se expone en la figura 4, se distingue que la magnitud de variación de voltaje total aumenta a medida que el número de usuarios paralelamente también lo hace y esto se explica, ya que, a medida que el número de usuarios a agrupar aumenta disminuye los clústeres resultantes y con ello, la potencia tiene una magnitud mayor, por lo que, dará como resultado un incremento sustancial en la caída de voltaje. Un detalle adicional de la figura 4 es que el calibre del conductor es una variable

fundamental para minimizar las variaciones de voltaje en cada primario de los transformadores de distribución. A medida que se incrementa el calibre del conductor la variación de voltaje disminuye, si se observa en la figura 4 cuando $k = 2$ la máxima caída de voltaje no supera el 0.25%, sin embargo, cuando $k = 32$ solo se dispone de 1 clúster, por lo tanto, la potencia total acumulada será la sumatoria de las demandas parcial del escenario, es decir, de los 32 transformadores de distribución emplazados, por lo que, la demanda será muy alta y técnicamente no será viable con conductores AWG 4, 2 y 1/0. Sin embargo, para $k = 32$ es técnicamente viable para calibres 2/0, 3/0 y 4/0 como se ilustra en la figura 2, puesto que, no se supera el 1% de caída de voltaje indicado en las normativas internacionales. En este punto, se puede mencionar que a medida que el calibre del conductor aumenta o disminuye su costo también lo hace y en esta investigación no se lo ha considerado.

La heurística propuesta es una herramienta versátil que permite seleccionar o decidir sobre el calibre del conductor que se debería emplear en cada caso de estudio, además, permite conocer la longitud real requerido para la implementación de SAE. Un detalle adicional que influye sobre la mejor topología para emplazar SAE es la tecnología y capacidad disponible, de tal manera que, el presente modelo puede ajustarse a las diferentes realidades y proporcionar múltiples opciones que permitirá sin lugar a duda al diseñador decidir sobre alguna u otra solución propuesta por el modelo.

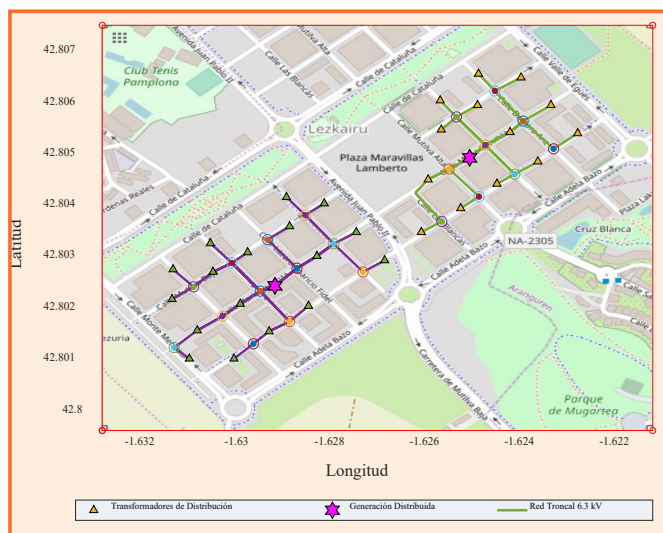


Figura 5. Óptimo despliegue georreferenciado de SAE para $k = 16$. Fuente Autores.

La figura 5 ilustra uno de los mejores posibles escenarios, es decir, la heurística proporciona soluciones globales a nivel de trayectoria (topología), sin embargo, por las múltiples variables de ingreso y criterios de diseño la solución óptima global lo será únicamente para cada caso específico respondiendo a las variables de ingreso (sección del conductor y número de usuarios aproximado por cada agrupación).

Por lo tanto, la solución es global para cada caso, sin embargo, la solución final estará sujeta a las prácticas de diseño de cada región.

Existe 5 soluciones posibles en cada valor de k , sin embargo, el costo del conductor será un parámetro fundamental para decidir en el precio final de SAE. Por lo tanto, de las 5 opciones que no supera el 1% de variación de voltaje el menos costoso es el de menor sección, que, para el caso es de AWG 2.

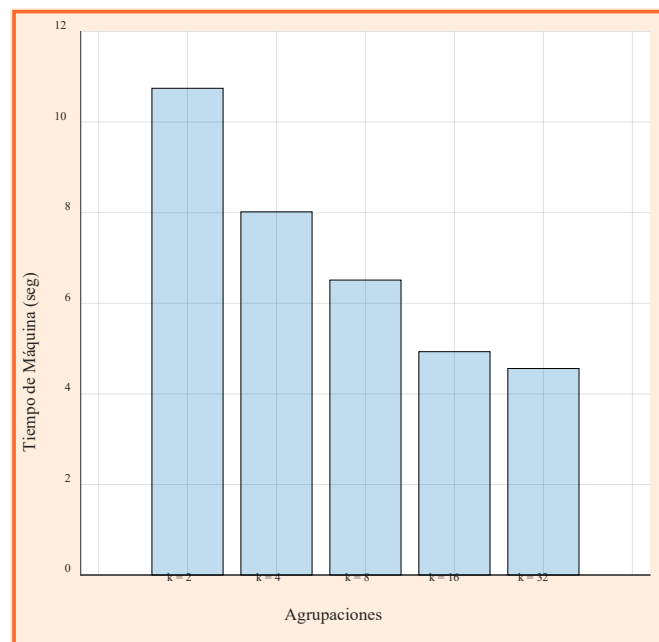


Figura 6. Rendimiento del algoritmo en función de la variación de segmentos. Fuente Autores.

En la figura 6 se ilustra el tiempo de máquina empleado por el ordenador para resolver cada uno de los casos ensayados en el presente artículo. El modelo fue evaluado en un ordenador Intel Core i7 con 8 RAM.

Se puede observar que a medida que el número de segmentaciones disminuye también lo hace el tiempo de máquina empleado para dar solución al problema.

Esto se debe porque, a mayor número de segmentaciones, existe mayor número de exploraciones posibles que debe ejecutar el ordenador, por lo tanto, cuando existe un único segmento las múltiples combinaciones son reducidas ya que el área está limitada por las trayectorias trazadas en el escenario estudiado.

Por lo tanto, el modelo ha demostrado ser flexible, versátil y finito y es capaz de dar solución al emplazamiento geolocalizado de SAE considerando variables de entrada reales. Adicionalmente, permite al diseñador tomar decisiones basándose en fundamentos técnicos y económicos.

6. Conclusiones

En el artículo se ha comprobado la eficacia de la heurística planteada, se ha determinado la ubicación óptima dentro de una red de distribución georreferenciada, en el escenario analizado, se puede evidenciar que, entre todas las posibles configuraciones de sitios factibles, conductores y carga aleatoria, la óptima se consigue con la mayor parte de usuarios conectados y con pérdidas en el orden de xxx%, dando valor agregado a la investigación con datos de usuarios y distancia geolocalizados.

En futuros trabajos se evaluará el modelo adicionando una variable de decisión asociada a los costos de inversión, mantenimiento y reemplazo, convirtiendo el modelo en un problema de optimización multiobjetivo.

REFERENCIAS

- [1] H. T. Marcondes dos Santos and J. A. Perrella Balestieri, "Spatial analysis of sustainable development goals: A correlation between socioeconomic variables and electricity use," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 97, no. July, pp. 367–376, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.08.037.
- [2] J. Gunawan, P. Permatasari, and C. Tilt, "Sustainable development goal disclosures: Do they support responsible consumption and production?," *J. Clean. Prod.*, vol. 246, p. 118989, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118989.
- [3] I. Dusparic, A. Taylor, A. Marinescu, V. Cahill, and S. Clarke, "Maximizing renewable energy use with decentralized residential demand response," *2015 IEEE 1st Int. Smart Cities Conf. ISC2 2015*, pp. 1–6, 2015, doi: 10.1109/ISC2.2015.7366212.
- [4] A. Kavvada and A. Held, "Analysis-ready earth observation data and the united nations sustainable development goals," *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, vol. 2018-July, pp. 434–436, 2018, doi: 10.1109/IGARSS.2018.8519405.
- [5] V. Akuraju, P. Pradhan, D. Haase, J. P. Kropp, and D. Rybski, "Relating SDG11 indicators and urban scaling – An exploratory study," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 52, no. October 2019, p. 101853, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2019.101853.
- [6] N. AlQattan, M. Acheampong, F. M. Jaward, F. C. Ertem, N. Vijayakumar, and T. Bello, "Reviewing the potential of Waste-to-Energy (WTE) technologies for Sustainable Development Goal (SDG) numbers seven and eleven," *Renew. Energy Focus*, vol. 27, no. December, pp. 97–110, 2018, doi: 10.1016/j.ref.2018.09.005.
- [7] W. G. Santika, M. Anisuzzaman, P. A. Bahri, G. M. Shafiullah, G. V. Rupf, and T. Urmee, "From goals to joules: A quantitative approach of interlinkages between energy and the Sustainable Development Goals," *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 50, no. July 2018, pp. 201–214, 2019, doi: 10.1016/j.erss.2018.11.016.
- [8] S. Hajiaghasi, A. Salemnia, and M. Hamzeh, "Hybrid energy storage system for microgrids applications: A review," *J. Energy Storage*, vol. 21, no. December 2018, pp. 543–570, 2019, doi: 10.1016/j.est.2018.12.017.
- [9] H. Deng and T. Ikegami, "Fuel cost reduction effects by introducing storage batteries in a power system," *Int. Conf. Innov. Smart Grid Technol. ISGT Asia 2018*, pp. 1135–1140, 2018, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2018.8467918.
- [10] P. Chandhra Sekhar, R. A. Deshpande, and V. Sankar, "Evaluation and improvement of reliability indices of electrical power distribution system," *2016 Natl. Power Syst. Conf. NPSC 2016*, no. November 2001, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1109/NPSC.2016.7858838.
- [11] Z. Parvini, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Moeini-Aghtaie, "Operational Reliability Studies of Power Systems in the Presence of Energy Storage Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 4, pp. 3691–3700, 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2771521.
- [12] C. K. Das, O. Bass, G. Kothapalli, T. S. Mahmoud, and D. Habibi, "Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, no. November 2016, pp. 1205–1230, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.068.
- [13] C. Root, H. Presume, D. Proudfoot, L. Willis, and R. Masiello, "Using battery energy storage to reduce renewable resource curtailment," *2017 IEEE Power Energy Soc. Innov. Smart Grid Technol. Conf. ISGT 2017*, pp. 1–5, 2017, doi: 10.1109/ISGT.2017.8085955.
- [14] T. Li, M. Dong, and S. Member, "Residential Energy Storage Management With Bidirectional Energy Control," *IEEE Trans. SMART GRID*, vol. 10, no. 4, pp. 3596–3611, 2019.
- [15] S. Koohi-Kamali, V. V. Tyagi, N. A. Rahim, N. L. Panwar, and H. Mokhlis, "Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 25, pp. 135–165, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.03.056.
- [16] C. Parthasarathy, S. Dasgupta, and A. Gupta, "Optimal sizing of energy storage system and their impacts in hybrid microgrid environment," *2017 IEEE Transp. Electrification Conf. ITEC-India 2017*, vol. 2018-January, pp. 1–6, 2018, doi:

- 10.1109/ITEC-India.2017.8333862.
- [17] J. C. Beardsall, C. A. Gould, and M. Al-Tai, "Energy storage systems: A review of the technology and its application in power systems," *Proc. Univ. Power Eng. Conf.*, vol. 2015-Novem, pp. 1–6, 2015, doi: 10.1109/UPEC.2015.7339794.
- [18] M. Faisal, M. A. Hannan, P. J. Ker, A. Hussain, M. Bin Mansor, and F. Blaabjerg, "Review of energy storage system technologies in microgrid applications: Issues and challenges," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 35143–35164, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2841407.
- [19] Y. S. Mohammed, A. A. Maruf, S. Thomas, G. Koyunlu, U. Usman, and S. A. Adeshina, "A Synopsis for Utilization of Energy Storage Systems in Distributed Power Generation," *IEEE PES/IAS PowerAfrica Conf. Power Econ. Energy Innov. Africa, PowerAfrica 2019*, pp. 204–208, 2019, doi: 10.1109/PowerAfrica.2019.8928863.
- [20] F. Nadeem, S. M. S. Hussain, P. K. Tiwari, A. K. Goswami, and T. Selim Ustun, "Review of Smart and Innovative Energy Storage Systems," *Proc. - Int. Conf. Vis. Towar. Emerg. Trends Commun. Networking, ViTECoN 2019*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/ViTECoN.2019.8899397.
- [21] S. O. Showers and A. K. Raji, "Benefits and Challenges of Energy Storage Technologies in High Penetration Renewable Energy Power Systems," *IEEE PES/IAS PowerAfrica Conf. Power Econ. Energy Innov. Africa, PowerAfrica 2019*, pp. 209–214, 2019, doi: 10.1109/PowerAfrica.2019.8928644.
- [22] J. Liu, X. Chen, S. Cao, and H. Yang, "Overview on hybrid solar photovoltaic-electrical energy storage technologies for power supply to buildings," *Energy Convers. Manag.*, vol. 187, no. December 2018, pp. 103–121, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.02.080.
- [23] J. Sardi, N. Mithulananthan, and D. Q. Hung, "Strategic allocation of community energy storage in a residential system with rooftop PV units," *Appl. Energy*, vol. 206, no. August, pp. 159–171, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.186.
- [24] L. A. Wong, V. K. Ramachandaramurthy, P. Taylor, J. B. Ekanayake, S. L. Walker, and S. Padmanaban, "Review on the optimal placement, sizing and control of an energy storage system in the distribution network," *J. Energy Storage*, vol. 21, no. December 2018, pp. 489–504, 2019, doi: 10.1016/j.est.2018.12.015.
- [25] H. Saboori, R. Hemmati, S. M. S. Ghiasi, and S. Dehghan, "Energy storage planning in electric power distribution networks – A state-of-the-art review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no. May, pp. 1108–1121, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.171.
- [26] A. T. Eseye, M. Lehtonen, T. Tukia, S. Uimonen, and R. J. Millar, "Exploiting Flexibility of Renewable Energy Integrated Buildings for Optimal Day-Ahead and Real-Time Power Bidding Considering Batteries and EVs as Demand Response Resources," *Int. Conf. Eur. Energy Mark. EEM*, vol. 2019-Septe, 2019, doi: 10.1109/EEM.2019.8916277.
- [27] Y. Kuang, X. Wang, and Z. Zhu, "Optimal Bidding Strategy for a RES Virtual Power Plant in the Spot Market," pp. 1480–1485, 2020, doi: 10.1109/ispec48194.2019.8975382.
- [28] H. Nazaripouya, Y. Wang, P. Chu, H. R. Pota, and R. Gadh, "Optimal sizing and placement of battery energy storage in distribution system based on solar size for voltage regulation," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2015-Septe, pp. 1–5, 2015, doi: 10.1109/PESGM.2015.7286059.
- [29] M. Parol, T. Wójtowicz, K. Księżyk, and C. Wenge, "Electrical Power and Energy Systems Optimum management of power and energy in low voltage microgrids using evolutionary algorithms and energy storage," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 119, no. April 2019, p. 105886, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.105886.
- [30] J. Zhuang, G. Shen, J. Yu, T. Xiang, and X. Wang, "Micro-grid energy storage location and sizing optimization method based on demand response," *Proc. - 2016 Int. Conf. Intell. Transp. Big Data Smart City, ICITBS 2016*, no. 4, pp. 517–520, 2017, doi: 10.1109/ICITBS.2016.21.

Herramientas de infraestructura como código: ansible, terraform, chef, puppet

Tool infrastructure as code: ansible, terraform, chef, puppet

Luis Dominguez-Quintero ¹, Miguel Vargas-Lombardo ^{2*}

¹ Maestría TICS-Senacyt, Universidad tecnológica de Panamá, Panamá

² Gises, Universidad Tecnológica de Panamá

*Autor de correspondencia: miguel.vargas@utp.ac.pa

RESUMEN— Las herramientas de Infraestructura como código (IaC) permiten automatizar las tareas realizadas por los departamentos de IT de forma rápida y dinámica mediante el uso de lenguajes de programación de *scripts*, que permiten administrar, crear, manipular y distribuir múltiples recursos informáticos a gran escala dentro de una infraestructura de *Cloud Computing*. Las herramientas de Infraestructura como código *Ansible*, *Terraform*, *Chef*, *Puppet* generan una representación virtual de toda la infraestructura física y escalable de una plataforma *Cloud Computing* y de Centro de Datos, facilitando que esta sea programable y dinámica.

Palabras clave— *Infraestructura como código, Ansible, Terraform, Chef, Puppet.*

ABSTRACT- Infrastructure tools such as code (IaC) allow the tasks performed by IT departments to be automated quickly and dynamically through the use of scripting languages, which allow managing, creating, manipulating and distributing multiple large-scale computing resources within of Cloud Computing infrastructure. Infrastructure tools such as Ansible code, Terraform, Chef, Puppet, generate a virtual representation of all the physical and scalable infrastructure of a Cloud Computing and Data Center platform, making it easy to program and dynamic.

Keywords— *Infrastructure as code, Ansible, Terraform, Chef, Puppet.*

1. Introducción

La Infraestructura como Código o *Infrastructure as Code* (IaC) es la práctica de automatizar tareas de configuración y aprovisionamiento en una infraestructura de Computación en la Nube (*Cloud Computing*) [1] y Centro de Datos mediante el desarrollo de código [2][3][4]. Para ello, toda la infraestructura física es representada de forma virtual, como si fuera un *software* o un dato que se puede manejar de forma dinámica mediante la programación de rutinas *scripts*. Estas rutinas de *scripts* son ejecutadas por aplicaciones conocidas como *runners* que se encargan de implementar las órdenes codificadas en esos *scripts* [5]. En consecuencia, como la infraestructura es 'código programable', podemos administrarla de forma dinámica

mediante el uso de herramientas de desarrollo de *software*, tales como los sistemas de control de versiones, pruebas automatizadas, orquestación de recursos, abriendo así, también la posibilidad del uso buenas prácticas de programación, como lo es la integración y despliegue continuo.

Algunas de las herramientas de IaC más reconocidas son: *Ansible* [6], *Terraform* [2], *Chef* [7] y *Puppet* [8]. Son utilizadas en la configuración y aprovisionamiento de servicios en la nube, así como en los entornos de desarrollo de *software*. Organizaciones de Tecnologías de Información como *GitHub*, *Mozilla*, *Amazon* y *Netflix* están usando *IaC* para automatizar los procesos relacionados con la administración de sistemas escalables de base de datos, recursos de *hardware* bajo

Citación: L. Dominguez y M. Vargas, "Herramientas de infraestructura como código: ansible, terraform, chef, puppet" *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 2, pp. (), 2021.

Tipo de artículo: Revisión. **Recibido:** 25 de mayo de 2020. **Recibido con correcciones:** 17 de junio de 2020. **Aceptado:** 12 de enero de 2021.

DOI

Copyright: 2021 L. Dominguez y M. Vargas. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

demanda, recursos de *software* bajo demanda, cuentas de usuario o generación de certificados digitales [9] o para crear máquinas virtuales para implementar un servidor *Web* o de base de datos distribuidas.

Este trabajo de investigación básica está organizado de la siguiente manera. En la sección 2, se explican los principios de IaC; en la sección 3, se comenta el ciclo de vida IaC; en la 4, presentamos las plataformas dinámicas IaC; la sección 5 aborda el tema de las herramientas IaC, y, finalmente, las conclusiones de esta investigación.

2. Principios de la IaC

Para implementar una infraestructura dinámica y automatizada con herramientas IaC, se requiere que los departamentos de tecnología de información hagan un análisis de su actual infraestructura para elegir la estrategia de IaC adecuada, basándose en los siguientes principios:

- *Los sistemas son recreables*: Capacidad de poder construir y reconstruir una parte o toda una infraestructura las veces que sea necesarias mediante los scripts programados. Por ejemplo, escoger la versión de librerías que un software necesita o el aprovisionamiento de un servidor virtual en la Cloud Computing.
- *Los sistemas deben estar fácilmente disponibles*: Como sabemos, en la IaC, la infraestructura es dinámica por lo que debemos tener la capacidad de poder crearla, destruirla, reemplazarla, redimensionarla y moverla de un lugar a otro. Esto lo permiten solo los sistemas que son adaptable al cambio.
- *Los sistemas son consistentes*: Capacidad de reproducir de forma idéntica elementos de la infraestructura a partir de un mismo *script* de configuración, sin que ello represente ningún tipo de diferencia. Por ejemplo, si creamos 100 servidores virtuales de base de datos que varían entre 40gb – 2 TB y la base de datos *Postgresql* 6.3, cada vez que generemos un servicio nos presentará esta configuración.
- *Los procesos deben poder ser repetibles*: Los sistemas pueden ser reproducidos todas las veces que sea necesario a partir del mismo archivo de *scripts*. Por ejemplo, dentro de un entorno de programación, podemos crear un servidor de pruebas y, en caso de fallos, crear una versión idéntica del servidor de forma fácil y rápida.

- *Los sistemas deben ser diseñados para estar en constante cambio*: La infraestructura de *Cloud Computing* es física y hacer un cambio como aumentar la capacidad de disco duro o el ancho de banda ancha de internet, sin detener la producción, es complejo y caro. Pero una infraestructura virtual de *Cloud Computing* dinámica permite cambiar un sistema existente de forma fácil y rápida. Para que esto sea posible tanto los *softwares* como la infraestructura deben estar diseñados de forma simple.

3. Ciclo de vida IaC

Durante el ciclo de vida de una infraestructura virtual basada en IaC, se realiza las siguientes actividades:

- *Uso de Archivos de Definición (Scripts)*: Una de las principales actividades de las herramientas de Infraestructura como Código es la codificación y uso de los archivos de definición. Un archivo de definición especifica qué elementos de la infraestructura serán utilizados y cómo deben ser configurados. Los archivos de definición son la guía que utilizan las herramientas de IaC para realizar aprovisionamiento y/o configuración de los elementos de la infraestructura. Un elemento puede ser uno o varios servidores virtuales, que tipos o versiones de sistemas operativos o cuanta memoria RAMs tendrán.
- *Documentación de los sistemas y los procesos*: En la IaC es necesario documentar los procedimientos realizados en el archivo de definición, en las rutinas programadas, así como capturar los eventos que acontecen durante la ejecución de los *scripts*.
- *Se crean versiones de todos los elementos de la IaC*: Un sistema de control de versiones (SCV) de los archivos *script* o rutinas es el elemento principal de una infraestructura de *Cloud Computing* administrada por código. Los SVC mantienen un control de los estados de los elementos de una infraestructura y, cualquier cambio en los SCV, se refleja en un cambio en la infraestructura virtual de *Cloud Computing*. Un sistema de SCV permite hacer un seguimiento de los cambios en los elementos y en las configuraciones de una infraestructura, hacer *rollback* en caso de un problema en el sistema, disparar *trigger* para realizar determinadas tareas en caso de algún problema en la infraestructura.

- *Se crean sistemas y procesos de prueba continua:* Las pruebas automatizadas son una práctica importante dentro de los procesos de desarrollo de *software*. Cuando la infraestructura de *Cloud Computing* está automatizada, podemos crear procedimientos para la realización de pruebas automatizadas por cambios realizados en el *software* o en sus configuraciones, permitiendo así recibir retroalimentación rápida del comportamiento del *software* ante determinados cambios o fallos que se presenten.
- *Es mejor implementar pequeños cambios, que grandes cantidades:* Cuando estamos realizando cambios en los archivos de *scripts* es aconsejable hacer cambios poco a poco, crear versiones del mismo e ir haciendo pruebas para ver el comportamiento del sistema.
- *Mantener los servicios continuamente disponibles:* Con las herramientas de IaC, se puede generar rutinas que detecten la situación de un servidor o un determinado servicio y, en el caso de que surjan eventualidades o fallos, las rutinas de IaC puedan restablecer los servicios o levantar el servidor o, en caso de un fallo grave, reconstruir toda o parte de la infraestructura de *Cloud Computing*.

4. Plataformas dinámicas IAC

Las herramientas de software de infraestructura como código generan una representación abstracta de los diferentes recursos con los que cuenta la plataforma de *Cloud Computing*. Estos recursos son, a nivel de *hardware* y *software*, el almacenamiento de espacio y las conexiones de red, los cuales deben ser programables, demandables y autoadministrables.

4.1. Características de las plataformas dinámicas

Para que una plataforma como infraestructura[10] sea dinámica y administrada por IaC, debe cumplir con las siguientes características:

- *Ser programable:* La plataforma debe tener herramientas de software de fácil uso o APIS. Algunas herramientas de IaC son: *Ansible* [6], *Terraform* [2], *Chef* [7] y *Puppet* [8], que tienen sus propias nomenclaturas de *scripts* o lenguaje de programación.
- *Demandable:* Una plataforma dinámica tiene que permitir crear, cambiar o eliminar cualquier elemento de la infraestructura de forma rápida, ya sea en minutos o en milésimas de segundos.
- *Autoadministrable:* El usuario debe tener acceso ya por medio de las herramientas de *software* o APIS de programación y así administrar los recursos de la plataforma sin la necesidad de un asesor externo o departamento de IT, salvo para situaciones muy graves.

4.2. Tipos de recursos de una plataforma dinámica

Como hemos comentado, una plataforma dinámica de *Cloud Computing* está compuesta por diversos recursos que, por lo general, están agrupados de la siguiente manera:

- **Computo:** Estos recursos son instancias de servidores, conocidos también como servidores virtuales, los cuales deben poder ser creados, cambiados o eliminados con facilidad. Estos servidores virtuales son una representación en *software* de un servidor físico que puede tener instalado uno o varios servicios (*Cloud*).
- **Almacenamiento:** Una plataforma basada en una infraestructura dinámica debe poder asignar recursos de espacio de almacenamiento requeridos de forma fácil, sin que el usuario conozca todos los detalles técnicos de como la información es guardada.
- **Redes:** Las plataformas de infraestructura dinámica deben contar con la capacidad de administrar y controlar la conectividad de red interna y externa de los diferentes elementos que componen la infraestructura de forma fácil. Esto, por lo general, es a nivel del enrutamiento de redes, balanceo de carga, cambio dinámico de las reglas del cortafuego, agregar o restringir las conexiones de red de un servidor.

Los servicios que ofrecen las plataformas dinámicas se basan en los tres elementos anteriormente mencionados, pero también puede ofrecer variaciones de estos. Como, por ejemplo, un servidor virtual con espacio de almacenamiento asignado y que tenga balanceo de carga de las conexiones de red con otros servidores, servicios de autenticación de usuarios, etc.

5. Herramientas IaC

En el mercado, existen diversas herramientas de Infraestructura como código que permiten a los usuarios asignar y configurar, de forma dinámica, los recursos disponibles dentro de una infraestructura de *Cloud Computing* virtual de manera que podamos

documentarla, recrearla, probarla y reusarla todas las veces que sea necesario, por interface de usuario (GUI), línea de comandos o el uso de API Programables, o usando lenguajes de *scripts* los cuales se asemejan a los lenguajes de programación como es el caso de *Ansible* [6], *Chef* [7] y *Puppet* [8] y el uso de archivos de definición de configuraciones, cuya sintaxis es similar al XML o JSON, como es el caso de *Terraform* [2].

Si utilizamos una herramienta de IaC para la automatización de procesos basadas en *script*, se debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- **Interface Scriptable:** Además de las interfaces de usuario (GUI) que dan muchos proveedores (*Hosting Cloud Computing* y *GPU*), es necesario que la IaC tenga *software* en líneas de comandos, APIS Programables y acceso a código fuente para que los equipos de IT puedan personalizar determinadas funcionalidades o hacer labores de integración con otros tipos de sistemas.
- **Herramientas de comandos con modo desatendido** (Software que puede tener o no interface de usuario GUI): Mediante una interface de línea de comando, debemos poder crear *scripts* por medio de lenguaje de programación de *scripts*, que deben tener accesos a los elementos de la plataforma como variables del entorno, otros comandos vía parámetros, credenciales, licencias, etc.
- **Soporte para modo desatendido:** La mayoría de los administradores deben poder escribir sus *scripts* de rutinas sin la necesidad de intervención humana, durante la ejecución de una tarea o conjunto de ellas de forma automática.
- **Configuración externalizada:** Se debe ofrecer un conjunto de herramientas para la creación, cambio, configuración o eliminación de recursos virtuales en plataformas externas a la nuestra.

Como hemos mencionado, los *scripts* de la IaC deben funcionar en modo desatendido, silencioso o de consola; por lo cual, con el fin de rastrear el funcionamiento de estos *scripts* de programación, estos deben cumplir con los siguientes criterios:

- **Ser improcedentes:** Debe ser posible ejecutarlo varias veces, sin efectos negativos [11].
- **Prerevisables:** Se tiene que validar, demostrar si cumple con las condiciones antes de realizar la ejecución del script.

- **Posrevisables:** Se tiene que generar un mecanismo que notifique si los comandos se ejecutaron de forma correcta.
- **Fallos visibles:** Cuando una tarea falla esto tiene que ser visible de alguna manera para que el equipo de IT logre solucionarlo.

Por otro lado, al escoger herramientas *software* IaC basadas en archivos de definición de configuración (ADC), hay que considerar que estos son archivos que describen los elementos estáticos y parametrizables de los diversos recursos o elementos de una infraestructura de *Cloud Computing* virtual. Además, tienen su propia nomenclatura de cómo se especifican los elementos y recursos de la infraestructura, esta nomenclatura también conocida como Lenguajes de Especificación de Dominio (*Domain-specific Languages - DSL*) son implementados en *Terraform*, *CFEngine*, *Chef* y *Puppet*. Otras de las ventajas de los ADC es que pueden ser reutilizables y, por medio de un sistema de control de versiones, se tiene acceso a diferentes versiones de una plataforma virtual. Dependiendo del tipo de tareas que serán automatizadas y de los recursos que serán administrados de forma dinámica, se escoge la herramienta de IaC adecuada a implementar, ya sea para creación, configuración, corrida de comandos en servidores o para el manejo de contenedores.

4.3. Configuración de servidores

Para la creación y configuración de servidores con *Ansible*, *Chef*, *Puppet*. Este tipo de herramientas usan archivos de definición de configuración para implementar la creación del servidor. Además, muchas de estas herramientas de configuración utilizan un agente instalado en cada servidor. El agente es un *software* que periódicamente busca en un repositorio central, la última versión de los ADC para aplicarlo a la infraestructura de *Cloud Computing* [1].

4.4. Empaquetamiento de plantilla de servidores

Con el fin de ahorrar tiempo en la implementación de servidores para funciones específicas como Servidor *Web*, Base de Datos, Almacenamiento o Video *Streaming*, existen herramientas como *Aminator* [2] que tienen plantillas para la creación de servidores que empaquetan o agrupan todo el *software* y las configuraciones requeridas para creación de un determinado tipo de servidor.

4.5. Correr comando en un *cluster* de servidores

Correr comandos de forma remota en múltiples servidores es sumamente importante. Para la realización de este tipo de tareas existen herramientas como *MCollective*, *Fabric* y *Capistrano* [12] que pueden ser usadas para verificar, reparar problemas y también utilizar cualquier lenguaje de *scripts* que vienen con los sistemas operativos.

4.6. Manejo de contenedores

Los contenedores son una alternativa que permite correr aplicaciones a los servidores. Los sistemas de contenerización como *Docker* [13], *Rocket* [14] y *Windows Containers* son usados para definir y empaquetar todo lo necesario para que un proceso funcione en un archivo de imagen, de esta manera, podemos usar una aplicación determinada sin tener que instalar todo un sistema operativo completo. El contenedor puede ser distribuido, creado y correr diversas instancias a partir de una imagen del contenedor. Cada contenedor aísla los procesos y conexiones de redes hasta el sistema de archivo.

5. Conclusiones

Las herramientas de Infraestructura como Código (IaC) facilitan la administración de los centros de datos y de *Cloud Computing* de diversos proveedores de servicios en *Cloud*. La infraestructura como código tiene como objetivo desarrollar rutinas de *scripts* adaptables a los diversos servicios que una infraestructura como servicios en la *cloud computing* requiere al ofrecer a millones de empresas y usuarios. Con la IaC en la *Cloud Computing* se han construido herramientas de *software* como *Ansible*, *Chef*, *Puppet*, las cuales facilitan la gestión de los grandes esquemas de *cluster* de servidores, contenedores, almacenamientos y conexiones a redes distribuidas.

REFERENCIAS

- [1] I. Foster, Y. Zhao, I. Raicu, and S. Lu, "Cloud Computing and Grid Computing 360-degree compared," *Grid Computing Environments Workshop, GCE 2008*, 2008.
- [2] K. Morris, "Infrastructure as code: managing servers in the cloud," *O'Reilly Media, Inc.*, p. 362, Jan. 2016.
- [3] S. Johann, "Kief Morris on Infrastructure as Code," *IEEE Software*, vol. 34, no. 1, pp. 117–120, 2017.
- [4] Y. Jiang and B. Adams, "Co-evolution of infrastructure and source code - An empirical study," *IEEE International Working Conference on Mining Software Repositories*, vol. 2015-Augus, pp. 45–55, 2015.
- [5] J. Wettinger, U. Breitenbücher, and F. Leymann, "DevOpsSlang - Bridging the gap between development and operations," *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 8745 LNCS, pp. 108–122, 2014.
- [6] N. K. Singh, S. Thakur, H. Chaurasiya, and H. Nagdev, "Automated provisioning of application in IAAS cloud using Ansible configuration management," *Proceedings on 2015 1st International Conference on Next Generation Computing Technologies, NGCT 2015*, no. September, pp. 81–85, 2016.
- [7] W. Hummer, F. Rosenberg, F. Oliveira, and T. Eilam, "Automated testing of chef automation scripts," *Proceedings of the Demo and Poster Track of ACM/IFIP/USENIX International Middleware Conference, MiddlewareDPT 2013*, 2013.
- [8] S. Dustdar, F. Leymann, and M. Villari, "Service Oriented and Cloud Computing: 4th European Conference, ESOC 2015 Taormina, Italy, September 15–17, 2015 Proceedings," *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 9306, no. September, pp. V–VI, 2015.
- [9] A. Rahman, R. Mahdavi-Hezaveh, and L. Williams, "A systematic mapping study of infrastructure as code research," *Information and Software Technology*, vol. 108, no. November, pp. 65–77, 2019.
- [10] B. Varghese and R. Buyya, "Next generation cloud computing: New trends and research directions," *Future Generation Computer Systems*, vol. 79, 2018.
- [11] W. Hummer, F. Rosenberg, F. Oliveira, and T. Eilam, "Testing idempotence for infrastructure as code," *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 8275 LNCS, no. May 2014, pp. 368–388, 2013.
- [12] Diomidis Spinellis and Stephanos Androutsellis-Theotokis, "Software Development Tooling," no. December, pp. 21–23, 2014.
- [13] C. Boettiger, "An introduction to Docker for reproducible research," *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, vol. 49, no. 1, pp. 71–79, Jan. 2015.
- [14] Z. Kozhimbayev and R. O. Sinnott, "A performance comparison of container-based technologies for the Cloud," *Future Generation Computer Systems*, vol. 68, pp. 175–182, 2017.

Requerimientos no funcionales para sistemas basados en el Internet de las cosas (IoT): Una revisión

Non-functional requirements for Internet of Things (IoT) based systems: A review

Karina Ojo-Gonzalez¹ y Belén Bonilla-Morales^{2*}

¹Maestría TICS-Senacyt, Facultad de Ingeniería de Sistemas Computacionales, Panamá, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

²Departamento de Ingeniería de Software, Facultad de Ingeniería de Sistemas Computacionales, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: belen.bonilla@utp.ac.pa

RESUMEN— El análisis de los requerimientos es una fase crucial que determina las funcionalidades y propiedades que debe poseer un sistema a desarrollar, realidad a la que no escapan los sistemas que involucran el paradigma del Internet de las cosas (IoT). Este paradigma permite incrementar los niveles de automatización y autonomía de los sistemas y servicios tradicionales, lo que lo ha llevado a ganar presencia rápidamente en diversidad de dominios de aplicación. En este documento se realiza una revisión literaria apoyada con la norma ISO/IEC 25010, para identificar los requerimientos no funcionales prioritarios para cuatro dominios de aplicación: ciudad, hogar, agricultura y fábricas inteligentes; señalando para cada uno los aspectos asociados y atendidos de acuerdo con las características de calidad del producto.

Palabras clave— *Atributos de calidad, agricultura inteligente, ciudad inteligente, fábrica inteligente, hogar inteligente, Internet de las cosas, requerimientos no funcionales.*

ABSTRACT— The requirements analysis is a fundamental stage for software development projects where all functions and properties that must be addressed by a system are determined, this condition applies for every system including those that integrates Internet of things' technologies in their implementations. Internet of things paradigm allows increasing automation levels and systems' autonomy of the conventional services that already exists, becoming those benefits in the main reasons whereby the paradigm is present in different application domains. In this paper a systematic literature review is presented, in order to identify the most relevant non-functional requirements in four application domain: smart city, smart home, smart agriculture and smart factory; showing up their associated aspects and how there are currently being treated in base to ISO/IEC 25010 for software quality products.

Keywords— *Internet of things, non-functional requirements, quality attributes, smart agriculture, smart city, smart factory, smart home.*

1. Introducción

El desarrollo tecnológico en el que se vive en la actualidad queda evidenciado con la gama de dispositivos electrónicos existentes en el mercado que permiten el acceso a diversos servicios desde la palma de la mano, como es el caso de los teléfonos inteligentes. Cada uno de estos dispositivos, indistintamente de su propósito, requiere de un software que administre su funcionamiento.

El campo de la ingeniería de software ha tenido que evolucionar para adecuarse a las nuevas necesidades y

tecnologías presentes al momento de iniciar un proyecto de desarrollo de software [1], no solo a nivel de metodologías, sino al punto de requerir modificaciones en los patrones arquitectónicos existentes, a raíz de los nuevos requerimientos que se deben satisfacer para el correcto funcionamiento de los sistemas. Un ejemplo de estas nuevas tendencias es el paradigma de Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés para Internet of Things).

El Internet de las cosas [2], en forma general, consiste en una red de sensores y dispositivos que tiene la tarea de

Citación: K. Ojo y B. Bonilla; "Requerimientos no funcionales para sistemas basados en el Internet de las cosas (IoT)", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 2, pp. (no modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 28 de agosto de 2020. **Recibido con correcciones:** 10 de marzo de 2021. **Aceptado:** 10 de marzo de 2021.

DOI: 10.33412/idt.v17.2.3303

Copyright: 2020 K. Ojo y B. Bonilla. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

recolectar datos de su entorno con el propósito de tomar decisiones y posteriormente ejecutar acciones que mejoren dicho entorno. Una de sus principales características es la interacción entre los dispositivos de la red sin la intervención humana, siendo esta una de las razones que ha llevado a adecuar el enfoque tradicional de desarrollo de software y tomar en consideración requerimientos específicos y característicos para estos sistemas

Todo software se define por un conjunto de requerimientos funcionales y no funcionales [3], donde estos últimos se consideran los responsables de la calidad del producto final, por lo cual, en el presente documento se identifican a través de una revisión literaria, los requerimientos no funcionales que reciben mayor atención al momento del diseño de un sistema de IoT de acuerdo con su dominio de aplicación, tomando como referencia la norma ISO/IEC 25010 [4] utilizada para la evaluación de las propiedades de los productos de software IoT [5].

El documento se encuentra estructurado de la siguiente manera: la sección 2 presenta las generalidades de los sistemas de IoT, la sección 3 trata la metodología utilizada para revisión literaria, la sección 4 detalla la ejecución de la revisión, la sección 5 desglosa los resultados de la revisión y finalmente la sección 6 presenta la discusión de los hallazgos.

2. Antecedentes

El término de Internet de las cosas (IoT) se refiere a una estructura compuesta por dispositivos físicos o “things”, cuya comunicación e interacción es controlada por una infraestructura de software [6] y que tiene como objetivo recolectar datos de su entorno permitiendo el posterior tratamiento analítico de estos con vistas a generar información relevante para la toma de decisiones de las acciones a realizar sobre ese entorno [7], proceso que requiere un nivel de autonomía e inteligencia por parte del sistema [8].

Los sistemas de IoT se encuentran sujetos al dominio en el que se implementan, motivo por el que en [9] se propone un método para ejecutar el análisis de los requerimientos del sistema. Este método establece que lo primero a realizar es la definición formal del propósito del sistema, para entonces estudiar a detalle los elementos del entorno en el que se colocará el sistema y los dispositivos que mejor se adapten para recolectar los

datos bajo las condiciones del entorno; razón que soporta lo expresado por [10] en referencia al uso de microcontroladores para elevar la calidad de funcionamiento de los sistemas de IoT.

El levantamiento de los requerimientos persiste como una actividad crucial para la construcción de cualquier sistema y por lo que en muchos casos es necesario modificar o establecer nuevos lineamientos que permitan el adecuado análisis de los mismos, como lo detalla [1], donde se propone un conjunto de subprocesos a realizar para la definición de los requerimientos de sistemas IoT; sin embargo, estudios como [11], [12] demuestran que existe tendencia en darle mayor importancia a los requerimientos funcionales (FRs) que a los no funcionales (NFRs).

Los FRs representan las tareas o necesidades que se espera que el sistema satisfaga, mientras que los NFRs, definen los atributos de calidad que el producto final debe ofrecer, por lo tanto, no son percibidos a simple vista por los usuarios finales; sin embargo juegan un rol relevante durante el proceso de selección de las tecnologías con las que se implementará el sistema [13].

Algunos autores afirman la necesidad de contemplar aspectos referentes a los NFRs al momento de diseñar las arquitecturas destinadas a soportar sistemas IoT [14]–[16], no obstante, abordar todos los NFRs es una tarea compleja como lo indican [16] debido a que es común que existan conflictos entre los requerimientos [17], [18], lo que en otras palabras se refiere a que el solo hecho de alcanzar la totalidad de uno de los NFRs impacte negativamente sobre otro requerimiento que también es de interés en el producto final.

En base a lo anterior, se identifica el dominio (propósito y entorno) en el que se implementa el sistema IoT, como un factor determinante para los NFRs a contemplar durante el diseño y construcción del sistema. Actualmente los sistemas de IoT se pueden encontrar en distintos dominios como salud, ciudades inteligentes, agricultura e incluso en el sector industrial con las fábricas inteligentes [14], [19], [20].

Con el objetivo de identificar los NFRs característicos de los sistemas IoT para un determinado dominio de aplicación, en la siguiente sección se detalla la metodología utilizada para realizar la revisión literaria que soporta este trabajo.

3. Metodología de la investigación

La metodología seleccionada para la realización de la revisión sistemática literaria es la propuesta por Barbara Kitchenham [21] para investigaciones relacionadas al campo de la ingeniería de software. En esta sección se desarrollan los puntos concernientes a la preparación de la investigación.

3.1 Preguntas de investigación

Se definen las preguntas claves que servirán de guía para la recopilación de la información que será analizada posteriormente, basadas en lo expuesto en la sección de antecedentes.

RQ1- ¿Cuáles son los requerimientos no funcionales en un sistema IoT?: Esta pregunta tiene como propósito identificar los NFRs y las razones particulares por las cuales se hacen indispensables para un determinado dominio de aplicación.

RQ2- ¿Qué aspectos del sistema IoT se encuentran asociados a estos requerimientos no funcionales en cada dominio?: Esta interrogante tiene por objetivo identificar posibles diferencias en la perspectiva de la misma característica de calidad desde cada uno de los dominios estudiados.

3.2 Estrategia de búsqueda

En este punto se especifica cómo se realizará el proceso de búsqueda de los documentos que sean representativos para los objetivos de estudio en el presente documento.

3.2.1 Palabras claves

Tomando como referencia las preguntas de investigación, se procede a la selección de las palabras claves que permitan obtener los documentos más relevantes para los propósitos de la investigación. Es importante señalar que debido a que la mayor parte de las publicaciones en las librerías electrónicas se encuentran escritas en inglés, las palabras claves seleccionadas se encuentran en este idioma.

Las palabras seleccionadas son las siguientes: *Internet of things, software, non-functional requirements, quality attributes, non-functional properties, requirements, smart city, smart agriculture, smart home, smart manufacturing, smart factory*; además, para efectos de su inserción en los motores de búsqueda, se elaboró la siguiente cadena de búsqueda.

("Internet of things" OR "IoT") AND ("requirements" OR "non-functional requirements" OR "quality attributes" OR "non-functional properties")

Adicionalmente, la cadena fue sometida a adecuaciones de acuerdo con los motores de búsqueda utilizados, además de las variaciones derivadas de la especificación de cada dominio de aplicación objeto de estudio de la presente investigación.

3.2.2 Recursos literarios

Siendo esencial para la investigación contemplar los documentos con mayor relevancia y afines al área de la ingeniería de software, se han seleccionado como fuentes ScienceDirect, IEEE Xplore, ACM y SpringerLink.

3.2.3 Procedimiento de búsqueda

El procedimiento de búsqueda inicia con la introducción de la cadena de búsqueda en los motores de cada una de las librerías seleccionadas. Durante la primera fase se aplica un proceso de filtrado en base a los criterios de selección establecidos, considerando solo los títulos y resúmenes de los artículos. La segunda fase, es una revisión del contenido completo de los documentos resultantes de la primera fase. En caso de obtener pocos documentos, se procederá con la técnica de bola de nieve para encontrar más documentos relevantes para la investigación.

3.2.4 Criterios de selección

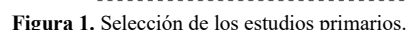
A pesar de los esfuerzos que se han realizado para garantizar la calidad de los sistemas IoT, tal como expresa [22] y siendo los NFRs factores determinantes en las propiedades de calidad, es fundamental analizar las variaciones de los NFRs de acuerdo con el contexto, por lo cual, este estudio se centra en cuatro dominios de aplicación: ciudad, hogar, agricultura y fábricas inteligentes.

En el caso de las ciudades y hogares inteligentes, la diferencia de escalas de ambos contextos se considera un elemento clave en la definición de los NFRs, motivando su selección en este primer estudio; por otra parte, se analizan los sistemas para entornos agrícolas e industriales, puesto que, son contextos que contrastan tanto en condiciones ambientales como en los sujetos o cosas que se encuentran en ellos, permitiendo evidenciar con mayor claridad los aspectos de calidad predominantes.

- E1:** Documentos no publicados en el rango de años 2010-2020.
- E2:** Documentos no publicados en revistas o conferencias.
- E3:** Documentos fuera del contexto de ingeniería de software.
- E4:** Documentos que no ofrezcan información relacionada a las preguntas de investigación.

El objetivo de la investigación es ofrecer una visión concreta de los requerimientos no funcionales y los métodos para alcanzarlos en sistemas IoT, por lo tanto, los documentos seleccionados deben ofrecer información como la siguiente:

- ¿El documento presenta definiciones y conceptos para las palabras claves?
- ¿El documento presenta los objetivos de los requerimientos no funcionales dentro de un dominio?
- ¿El documento reporta alguna carencia en lo referente al tratamiento de los requerimientos no funcionales para sistemas IoT en algún dominio en particular?



En esta sección se detalla el proceso de ejecución de la revisión. En la primera fase solo se contemplan los títulos y resúmenes de los documentos para su selección, mientras que en la segunda fase se realiza una revisión del texto completo para validar la relevancia del documento para la investigación.

El resumen de esta fase se muestra en la figura 1. El proceso de selección descarta aquellos documentos escritos en un idioma distinto al inglés. En la Figura 1 también se presenta la cantidad de documentos descartados en base a cada criterio de exclusión.

Esta fase constituye el proceso de análisis del texto completo de los artículos seleccionados en la primera fase. Debido a que solo se obtuvieron 28 documentos relevantes, se recurre a la aplicación de la técnica de bola de nieve para obtener más documentos, ejecutando una nueva búsqueda por cada dominio de aplicación de interés en esta investigación. Al finalizar la segunda fase se obtuvieron 23 documentos adicionales haciendo un total de 51 artículos para análisis.

En esta sección se presentan los resultados de la revisión.

Año de publicación	Número de publicaciones
2010	0
2011	1
2012	0
2013	1
2014	3
2015	3
2016	2
2017	14
2018	11
2019	10
2020	6

En la figura 2 se aprecia la distribución de publicaciones en el período 2010-2020. El gráfico al momento demuestra que a partir del año 2017 se presentó

un incremento en los estudios que tenían relación a la identificación de los requerimientos no funcionales en sistemas de IoT.

4.2 Requerimientos no funcionales por dominio de aplicación

En la tabla 1 se listan los NFRs que todo sistema de IoT debe contemplar al momento de su diseño. La interoperabilidad se refiere a la capacidad de interacción y comunicación entre dispositivos físicos mediante una infraestructura, de manera independiente a los proveedores; la escalabilidad, relacionada al número de dispositivos o entidades que maneje el sistema sin disminuir su rendimiento [23]; seguridad, mayormente orientado a la protección de los datos recolectados por los sensores o dispositivos físicos y finalmente, sensibilidad al entorno, capacidad del sistema para recolectar los datos generados por el cambio de condiciones en el contexto en el que se ha implementado.

Tabla 1. Requerimientos no funcionales comunes en los sistemas IoT.

NFR	Referencia
Interoperabilidad	[8], [9], [27]–[31], [10], [14]–[17], [24]–[26]
Escalabilidad/Flexibilidad	[8], [9], [29]–[33], [10], [14]–[16], [24], [26]–[28]
Seguridad	[10], [14], [29], [30], [32], [33], [15], [16], [20], [24]–[28]
Sensibilidad al entorno	[8], [9], [30], [10], [14], [16], [17], [20], [24], [26], [28]

Los NFRs en la tabla 1, no son los únicos que deben ser tomados en consideración para los sistemas de IoT, motivo por el que en los siguientes puntos se procede a identificar aquellos NFRs adicionales que reciben mayor atención de acuerdo con el dominio de aplicación en el que se planean implementar, utilizando como referencia la norma ISO 25010 [4] para atributos de calidad de los productos de software.

4.2.1 Ciudad inteligente

El concepto de ciudad inteligente se encuentra fundado en el uso de las nuevas tecnologías para el mejoramiento de los servicios tradicionales en entornos urbanos que debido a sus características económicas, políticas, sociales y ambientales; presentan condiciones complejas que dificultan su progreso y afecta su sostenibilidad [34], [35]. Estas tecnologías consisten en

una infraestructura de sensores [36] encargados de la recolección inteligente de datos que al ser analizados y evaluados permitan la creación de estrategias que automaticen y optimicen los procesos urbanos [37], [38].

Los procesos urbanos objeto de interés dentro de una ciudad inteligente varían desde la monitorización del consumo de servicios eléctricos, suministro de agua y transporte; hasta la prevención de desastres naturales así como la identificación de efectos degradación sobre estructuras de concreto como puentes y edificios, son aspectos de seguridad que también se analizan a través de las tecnologías IoT en una ciudad inteligente [37]–[39].

La naturaleza crítica de los procesos urbanos señalados reitera la importancia en garantizar la calidad del producto de software que administrará la infraestructura de la ciudad inteligente, impulsando estudios como [28], [40], donde el primero se centra en los requerimientos específicos para un sistema de control de tráfico inteligente; el segundo, aborda los requisitos generales para una plataforma de ciudad inteligente. Ambos trabajos coinciden en la necesidad de crear sistemas con alta interoperabilidad, escalabilidad y sensibilidad al contexto; no obstante, también mencionan los NFRs en la tabla 2.

En la tabla 2 se percibe que las características de eficiencia de desempeño, seguridad y portabilidad son las que se han reportado con mayor frecuencia en los estudios relacionados al diseño de plataformas de software para ciudades inteligentes.

Tabla 2. Requerimientos no funcionales para una plataforma IoT en el dominio de Ciudad Inteligente

Característica de calidad	Aspecto de interés para el sistema	Referencias
Eficiencia de desempeño	• Sostenibilidad	[28], [35], [37], [40]
	• Rendimiento	
	• Autonomía	
Usabilidad	• Integración	[34]
	• Transparencia	
Seguridad	• Autenticación	[28], [34], [35], [37], [38]
	• Integridad de los datos	
	• Privacidad	
Mantenibilidad	• Configurabilidad	[28], [40]
Portabilidad	• Movilidad	[28], [35], [37]

4.2.2 Hogar inteligente

Un hogar inteligente también es conocido como una solución de domótica, que tiene por objetivo que las personas que en él residen mejoren su calidad de vida al poder llevar un mayor control sobre aspectos cotidianos como seguridad, comodidad y ahorro energético [39], [41], [42], al integrar sensores y servicios dentro de una aplicación que puede ser configurada y monitorizada remotamente por los habitantes del hogar desde un teléfono inteligente o tableta, de acuerdo con sus necesidades individuales [41], [43].

Esto implica que la instalación, configuración y administración del sistema de hogar inteligente no necesariamente será realizado por una persona que posea conocimientos de programación o tenga experiencia previa con este tipo de sistemas, propiedad que se utiliza como base en [41] donde se identifican dos categorías de hogares inteligentes, la primera, cuyo levantamiento es realizado por personal experto; mientras que la segunda es aquella que la ejecutan los usuarios finales del sistema.

Un sistema IoT para hogar inteligente consta de un conjunto de herramientas de desarrollo, despliegue y de un software de gestión de los dispositivos que se encuentren conectados dentro de la red, elementos que varían de acuerdo con los fabricantes, generando un gran número de opciones de plataformas de software y hardware, lo que causa la carencia de estandarización en las tecnologías, y genera como resultado una gama de soluciones aisladas, incompatibles, de propósitos específicos y no reutilizables [44].

Por otra parte, el manejo de las interacciones entre los dispositivos sin afectar los servicios llaman a la necesidad de modernas prácticas de ingeniería de software para el diseño de las plataformas de software [44].

En el caso de los NFRs para un sistema de hogar inteligente, listados en la tabla 3, destacan las características de eficiencia de desempeño, usabilidad y seguridad; sin embargo, este último no representa la importancia debida para los usuarios finales, quienes despreocupadamente conectan y comparten cualquier dispositivo que contenga información sensitiva, ignorando los datos que pueden estar siendo transmitidos [41].

Tabla 3. Requerimientos no funcionales para una plataforma IoT en el dominio de hogares Inteligentes

Característica de calidad	Aspecto de interés para el sistema	Referencias
---------------------------	------------------------------------	-------------

Eficiencia de desempeño	- Consumo energético - Autonomía	[42], [44]–[46]
Usabilidad	- Interfaces intuitivas - Transparencia - Retroalimentación	[41], [42]
Confiabilidad	Tolerancia a fallos	[42], [46]
Seguridad	Privacidad	[41], [43], [46]
Mantenibilidad	Configurabilidad	[42]
Portabilidad	Movilidad	[42]

Tabla 4. Requerimientos no funcionales para una plataforma IoT en el dominio de agricultura Inteligente

Característica de calidad	Aspecto de interés para el sistema	Referencias
Eficiencia de desempeño	- Consumo energético - Topología de red - Ubicación de sensores - Autonomía	[47]–[50]
Compatibilidad	Sinergia entre dispositivos	[51]
Usabilidad	- Interfaces intuitivas - Retroalimentación efectiva	[52]
Confiabilidad	- Disponibilidad - Tolerancia a fallos	[48], [49], [53]
Seguridad	Administración de privilegios	[47]
Mantenibilidad	Facilidad de programación	[47]

4.2.3 Agricultura inteligente

El sector agrícola no ha quedado indiferente ante la modernización de los procesos con el uso de tecnologías de IoT. Este hecho se debe principalmente a la necesidad de incrementar la eficiencia en la productividad, mediante la adecuada utilización de los recursos y mitigando el impacto ambiental asociado a las actividades agropecuarias [47], [50]. Una técnica conocida es la agricultura de precisión [47] que se enfoca en la optimización y mejoramiento de los procesos agropecuarios a través de una monitorización en tiempo real de las condiciones ambientales y del suelo.

El conocimiento de las condiciones de los cultivos es posible gracias a los sensores y actuadores que conforman el sistema IoT. Los sensores se mantienen transmitiendo datos que al ser analizados, proveen la base para la toma de decisiones de las acciones que ejecutarán los actuadores del sistema [54], y además permite crear un historial que facilite la trazabilidad de los productos y cadenas de suministros añadiendo valor para el negocio a los datos recolectados [48].

Las soluciones de IoT en el sector agrícola no se limitan a las plantas, seres vivos; incluye todas las estructuras, equipos, maquinarias y vehículos que estarán conectados entre sí mediante dispositivos heterogéneos [53] dentro de una red, facilitando la visualización del estado del negocio, reduciendo costos y riesgos de producción, añadiendo un nivel de automatización en los procesos mejorando así la calidad y cantidad de los productos [39]. En la tabla 4 se listan los NFRs con mayor prioridad para sistemas dentro de este dominio.

En este dominio se le da mayor atención a la eficiencia de desempeño y confiabilidad del sistema, al tratarse de un contexto en el que se tratan seres vivos, que dependen del suministro de nutrientes, agua y algunos químicos para el control de plagas, sin excesos que puedan afectar el ambiente. A pesar de que solo un documento hace referencia a la usabilidad y mantenibilidad, el diseño de interfaces de baja complejidad es deseable con el objetivo de que cualquier persona con pocos o ningún conocimiento de programación pueda modificar y añadir funciones, debido a que estos sistemas generalmente se encuentran en zonas rurales en donde no se cuenta con personal experto que pueda solucionar problemas técnicos en el momento que se presente alguna eventualidad.

4.2.4 Fábrica inteligente

La clave de la industria inteligente está centrada en la idea crear sistemas adaptables a las condiciones cambiantes del entorno [55], apoyados en tecnologías innovadoras capaces de ajustar automáticamente las líneas de producción de manera eficiente, incrementando la producción y al mismo tiempo reduciendo los costos de los procesos sin afectar la calidad de los productos finales [56]–[58]. La automatización de los procesos dentro de las fábricas se logra con la integración de dispositivos inteligentes, entre los que incluyen aquellos de naturaleza robótica [55], que den paso a una mayor

precisión en la ejecución y monitorización de las tareas, lo que reduce la intervención humana.

Estos dispositivos no solo ejecutan tareas específicas, también son responsables de recolectar datos que brinden información acerca del estado de las maquinarias, identificando posibles fallas de manera temprana, aportando en el ahorro de tiempo y presupuesto, además de la sostenibilidad y calidad del sistema, los cuales son factores de vital importancia a la hora de realizar análisis predictivos de las operaciones del negocio para futuras inversiones [39], [58], [59].

Los autores de [20], [30] hacen énfasis que dentro de este dominio, los sistemas de IoT se enfrentan a los NFRs señalados en la tabla 5.

Tabla 5. Requerimientos no funcionales para una plataforma IoT en el dominio de Fábricas Inteligentes

Característica de calidad	Aspecto de interés para el sistema	Referencias
Eficiencia de desempeño	- Consumo de ancho de banda - Tiempos de respuesta - Autonomía - Precisión	[20], [30], [55], [58]
Usabilidad	Centrado en el humano	[56]
Seguridad	- Integridad - Confidencialidad	[20], [30]
Mantenibilidad	- Componentes reutilizables - Separación semántica - Configurabilidad	[56], [58]

En el dominio de fábricas inteligentes resaltan como propiedades deseables la eficiencia de desempeño en términos de consumo de ancho de banda, tiempos de respuesta y precisión en la ejecución de las tareas; con vistas a mitigar errores durante la producción y poder realizar los arreglos necesarios sin desperdiciar recursos.

La seguridad es deseable; sin embargo, es la mantenibilidad la que genera mayor interés en el sentido de que este contexto se presta para implementaciones a gran escala, lo que resalta la importancia de componentes reutilizables. Estos componentes deben tener propósitos bien definidos y ser de fácil configuración, de manera que al realizar las modificaciones al sistema no sea necesario la prolongación de los tiempos fuera de servicio, los

cuales afectarían negativamente la cadena de producción derivando en pérdidas frente a condiciones de alta competitividad, propias de la actualidad.

5. Discusión

Los NFRs definen las propiedades de calidad que se esperan del producto de software. En la Tabla 1, fueron presentados los NFRs que poseen en común los sistemas de IoT, evidenciando que la mayoría de los esfuerzos de diseño se han centrado en garantizar la escalabilidad del sistema de acuerdo con las necesidades actuales y futuras, sin afectar su desempeño, manteniendo especial atención en la comunicación entre todos los dispositivos y disponibilidad de los servicios involucrados; fortaleciendo las medidas de seguridad para salvaguardar la información que procesa el sistema.

Los sistemas de IoT, independientemente de su dominio, presentan la propiedad de sensibilidad al entorno o al contexto, relacionada a la capacidad del sistema de recolectar datos de las condiciones de su entorno mediante múltiples sensores y transmitirlos para su procesamiento con el fin de obtener información relevante para la toma de decisiones del sistema.

En las tablas 2, 3, 4 y 5; se listan las características de calidad reportadas como prioritarias en cada dominio, tomando como referencia la norma ISO/IEC 25010; no obstante, es el dominio el que define qué aspectos del sistema se contemplan para cada una de ellas, como se detalla a continuación:

5.1 Eficiencia de desempeño

La eficiencia de desempeño, relacionada al comportamiento, capacidad y utilización de recursos del sistema; figura como esencial en cada dominio.

En el caso de la ciudad inteligente, esta característica es definida por la factibilidad de la inversión y mantenimiento de un servicio de este tipo; es decir, el interés reside en el costo-beneficio que se percibe de la solución de IoT; pero también envuelve un factor crítico para la adecuada monitorización del entorno con vistas a la prevención de desastres. Para los hogares inteligentes y el sector agrícola surge como fundamental el factor de consumo energético en el que se prefieren soluciones que garanticen mayor tiempo de vida a los dispositivos que generalmente utilizan baterías como fuente de poder.

Para la agricultura inteligente aspectos técnicos como la ubicación de los sensores y topología de red, influyen en el alcance y eficiencia del sistema.

En el dominio de las fábricas inteligentes, esta característica está determinada por el consumo del ancho de banda y tiempos de respuesta del sistema. El sector industrial se caracteriza por poseer infraestructuras de gran escala, con variedad de maquinarias con propósitos específicos que generan enormes volúmenes de datos que al ser transmitidos para su procesamiento pueden saturar la red y causar tiempos muertos en la producción.

Un factor común para todos los dominios es el nivel de autonomía del sistema, puesto que las soluciones IoT buscan reducir la intervención del humano en la ejecución de los procesos, es preferible que estos sistemas posean un nivel de inteligencia para ejecutar acciones al momento de darse situaciones que lo ameriten.

El nivel de inteligencia va a depender de la naturaleza de los algoritmos de toma de decisiones que en ellos se utilicen. Estos pueden variar desde un simple conjunto de reglas para ejecutar determinada acción hasta complejos algoritmos de aprendizaje de máquina que son capaces de identificar patrones de comportamiento para ajustar el sistema.

5.2 Usabilidad

Los dominios de hogares y agricultura inteligente a menudo son instalados y configurados por usuarios comunes que no poseen conocimientos técnicos especializados en la manipulación de este tipo de sistemas. Esto hace imprescindible el diseño de interfaces sencillas que permitan una fácil programación o configuración del software y hardware de las soluciones IoT.

También se hace necesaria la transparencia, es decir, proveer retroalimentación entendible sobre el estado del sistema, de modo, que sea sencillo para los usuarios conocer si las configuraciones se han realizado correctamente y que todo está funcionando de acuerdo con lo esperado.

5.3 Confiabilidad

La confiabilidad en los dominios agrícola y de hogares inteligentes es vista principalmente desde la tolerancia a fallos, así como a la disponibilidad de los datos recolectados y servicios asociados.

Para la agricultura inteligente, un sistema confiable es vital debido a la naturaleza de los objetos con los que trabaja, plantas, seres vivientes que requieren constante monitorización para garantizar su adecuado desarrollo.

5.4 Seguridad

La seguridad, una característica común, presenta niveles de fortaleza de acuerdo con el dominio.

En las ciudades inteligentes se requieren técnicas de autenticación, identificación, integridad y privacidad de los datos que transitan en la red, debido al carácter sensitivo que estos pueden tener y que no deben ser alterados por terceros sin autorización en ninguna circunstancia; mientras que, para las fábricas y sector agrícola, aplicar administración de privilegios y mecanismos de control de acceso a los dispositivos es primordial.

En el ámbito de los hogares inteligentes, va ligado a la privacidad en términos de que los usuarios indican que se desconoce qué terceros pueden ver sus datos sobre todo aquellos que involucren aspectos de su rutina diaria, como los horarios en los que usualmente no se encuentran en casa.

5.5 Mantenibilidad

La mantenibilidad es la propiedad que permite a los sistemas ser modificados, analizados y reutilizados sin complicaciones. El sector de las fábricas inteligentes destaca mayor interés en esta propiedad por la naturaleza de las dimensiones de un entorno industrial en el que los equipos y maquinarias deben ser reemplazados cada determinado tiempo, por motivos de desgaste; y ser insertados sin afectar el funcionamiento global del sistema, lo que deriva en reducción de costos.

Para una solución de agricultura u hogar inteligente, esta característica va de la mano con la usabilidad, pues se debe tener una interfaz integral en la que los usuarios pueden crear nuevas funciones o modificar las existentes de acuerdo con sus necesidades individuales, sobre todo si se está en un lugar donde no es posible obtener ayuda de personal técnico en caso de urgencia.

5.6 Portabilidad

La portabilidad está asociada directamente con la movilidad o cualidad de los dispositivos que integran el sistema de migrar de una red a otra, sin perder su identidad. Es un aspecto deseable en los dominios de ciudades y hogares inteligentes, donde existen una gama de puntos a través de los que los dispositivos pueden acceder a internet; sin embargo, en el dominio de la agricultura inteligente no tiene mayor relevancia ya que el contexto de aplicación está generalmente ubicado en zonas alejadas a los centros urbanos donde no se cuenta con muchas opciones de infraestructuras comerciales. Por su parte, en una fábrica inteligente, los procesos de

producción se dan dentro de un espacio definido, limitando las interacciones de los dispositivos con los elementos que son relevantes para la ejecución de sus tareas, sin necesidad de movilizarse a otro punto o utilizar puntos de conexión a red externos.

6. Conclusiones

En este documento se realizó una revisión literaria en la que se identificaron los requerimientos no funcionales comunes para los sistemas basados en IoT, definiendo luego los aspectos específicos o de interés para dominios de aplicación como ciudades, hogares, agricultura y fábricas inteligentes.

En el proceso se utilizó la norma ISO/IEC 25010 como referencia para la identificación de los requerimientos no funcionales, evidenciando que para una misma característica se presentan diversas perspectivas dependiendo del dominio de aplicación o contexto para el cual se va a diseñar la solución IoT.

La información recabada en este documento tiene el propósito de ofrecer una guía rápida de los principales requerimientos no funcionales y condiciones a considerar al momento de diseñar un sistema para alguno de los dominios estudiados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Secretaría Nacional de Ciencias, Tecnología e Innovación (SENACYT) y la Universidad Tecnológica de Panamá, por la beca para ingresar al programa de Maestría en Ciencias de Tecnologías de Información y Comunicación.

REFERENCIAS

- [1] D. Silva, T. G. Gonçalves, and A. R. C. da Rocha, "A requirements engineering process for IoT systems," *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*, 2019.
- [2] Kevin Asthon, "That ' Internet of Things ' Thing," *RFID J.*, p. 4986, 2010.
- [3] B. Meyer, J.-M. Bruel, S. Ebersold, F. Galinier, and A. Naumchev, "Towards an Anatomy of Software Requirements," in *51st International Conference, TOOLS 2019*, 2019, pp. 10–40.
- [4] ISO/IEC, "ISO/IEC 25010:2011 - Systems and software engineering -- Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuARE) -- System and software quality models," 2011.
- [5] H. Muccini and M. T. Moghaddam, "IoT Architectural Styles," in *Beethoven: An Event-Driven Lightweight Platform for Microservice Orchestration*, vol. 1, no. September, Springer International Publishing, 2018, pp. 68–85.

- [6] F. Zambonelli, "Key Abstractions for IoT-Oriented Software Engineering," *IEEE Softw.*, vol. 34, no. 1, pp. 38–45, 2017.
- [7] J. H. Nord, A. Koohang, and J. Paliszkievicz, "The Internet of Things: Review and theoretical framework," *Expert Syst. Appl.*, vol. 133, pp. 97–108, 2019.
- [8] B. P. de Souza, R. C. Motta, and G. H. Travassos, "Towards the Description and Representation of Smartness in IoT Scenarios Specification," in *Proceedings of the XXXIII Brazilian Symposium on Software Engineering - SBES 2019*, 2019, pp. 511–516.
- [9] M. Kirsch-Pinheiro, R. Mazo, C. Souveyet, and D. Sprovieri, "Requirements Analysis for Context-oriented Systems," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 83, no. Ant, pp. 253–261, 2016.
- [10] J. F. Mendoza, H. Ordóñez, A. Ordóñez, and J. L. Jurado, "Architecture for embedded software in microcontrollers for Internet of Things (IoT) in fog water collection," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 109, no. 2016, pp. 1092–1097, 2017.
- [11] Nurbojatmiko, E. K. Budiardjo, and W. C. Wibowo, "SLR on identification & classification of non-functional requirements attributes, and its representation in functional requirements," *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*, pp. 151–157, 2018.
- [12] L. Sun and J. Park, "A Process-Oriented Conceptual Framework on Non-Functional Requirements," *Commun. Comput. Inf. Sci.*, vol. 432 CCIS, pp. 1–15, 2014.
- [13] G. Reggio, "A UML-based proposal for IoT system requirements specification," *Proc. - Int. Conf. Softw. Eng.*, pp. 9–16, 2018.
- [14] A. Giri, S. Dutta, S. Neogy, K. Dahal, and Z. Pervez, "Internet of things (IoT)," in *Proceedings of the 1st International Conference on Internet of Things and Machine Learning - IML '17*, 2017, pp. 1–12.
- [15] H. Muccini, R. Spalazzese, M. T. Moghaddam, and M. Sharaf, "Self-adaptive IoT architectures: An emergency handling case study," *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*, 2018.
- [16] P. M. Jacob and P. Mani, "Software architecture pattern selection model for internet of things based systems," *IET Softw.*, vol. 12, no. 5, pp. 390–396, 2018.
- [17] R. M. Carvalho, "Dealing with Conflicts Between Non-functional Requirements of UbiComp and IoT Applications," in *2017 IEEE 25th International Requirements Engineering Conference (RE)*, 2017, pp. 544–549.
- [18] D. Mairiza and D. Zowghi, "Constructing a Catalogue of Conflicts among Non-functional Requirements," *Commun. Comput. Inf. Sci.*, vol. 230, pp. 31–44, 2011.
- [19] P. Asghari, A. M. Rahmani, and H. H. S. Javadi, "Internet of Things applications: A systematic review," *Comput. Networks*, vol. 148, pp. 241–261, Jan. 2019.
- [20] C. Puliafito, E. Mingozzi, F. Longo, A. Puliafito, and O. Rana, "Fog computing for the Internet of Things: A survey," *ACM Trans. Internet Technol.*, vol. 19, no. 2, 2019.
- [21] B. Kitchenham, O. Pearl Brereton, D. Budgen, M. Turner, J. Bailey, and S. Linkman, "Systematic literature reviews in software engineering – A systematic literature review," *Inf. Softw. Technol.*, vol. 51, no. 1, pp. 7–15, Jan. 2009.
- [22] G. White, V. Nallur, and S. Clarke, "Quality of service approaches in IoT: A systematic mapping," *J. Syst. Softw.*, vol. 132, pp. 186–203, 2017.
- [23] X. Thang Nguyen, H. Tam Tran, H. Baraki, and K. Geihs, "Optimization of non-functional properties in Internet of Things applications," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 89, pp. 120–129, 2017.
- [24] E. Cavalcante, M. P. Alves, T. Batista, F. C. Delicato, and P. F. Pires, "An Analysis of Reference Architectures for the Internet of Things," in *Proceedings of the 1st International Workshop on Exploring Component-based Techniques for Constructing Reference Architectures - CobRA '15*, 2015, pp. 13–16.
- [25] P. Pace, G. Aloï, R. Gravina, G. Fortino, G. Larini, and M. Gulino, "Towards interoperability of IoT-based health care platforms: The INTER-health use case," *BodyNets Int. Conf. Body Area Networks*, pp. 12–18, 2016.
- [26] C. Cabrera, A. Palade, and S. Clarke, "An evaluation of service discovery protocols in the internet of things," in *Proceedings of the Symposium on Applied Computing - SAC '17*, 2017, vol. Part F1280, pp. 469–476.
- [27] M. P. Alves, F. C. Delicato, and P. F. Pires, "IoTA-MD," in *Proceedings of the Symposium on Applied Computing - SAC '17*, 2017, vol. Part F1280, pp. 1773–1780.
- [28] E. F. Z. Santana, A. P. Chaves, M. A. Gerosa, F. Kon, and D. S. Milojevic, "Software platforms for smart cities: Concepts, requirements, challenges, and a unified reference architecture," *ACM Comput. Surv.*, vol. 50, no. 6, 2017.
- [29] H. Jita and V. Pieterse, "A Framework to Apply the Internet of Things for Medical Care in a Home Environment," in *Proceedings of the 2018 International Conference on Cloud Computing and Internet of Things - CCIOT 2018*, 2018, pp. 45–54.
- [30] M. Brinkschulte, C. Becker, and C. Krupitzer, "Towards a QoS-aware Cyber Physical Networking Middleware Architecture," in *Proceedings of the 1st International Workshop on Middleware for Lightweight, Spontaneous Environments - MISE '19*, 2019, pp. 7–12.
- [31] L. Santos, E. Silva, T. Batista, E. Cavalcante, J. Leite, and F. Oquendo, "An architectural style for internet of things systems," *Proc. ACM Symp. Appl. Comput.*, pp. 1488–1497, 2020.
- [32] V. Sachidananda, J. Toh, S. Siboni, S. Bhairav, A. Shabtai, and Y. Elovici, "Let the cat out of the bag: A holistic approach towards security analysis of the internet of things," *IoTPTS 2017 - Proc. 3rd ACM Int. Work. IoT Privacy, Trust, Secur. co-located with ASIA CCS 2017*, pp. 3–10, 2017.
- [33] M. Kassab, V. V. G. Neto, and A. Allian, "Investigating quality requirements from a human perspective in IoT-

- based software architectures for education,” in *Proceedings of the 13th European Conference on Software Architecture - ECSA '19 - volume 2*, 2019, vol. 2, pp. 241–244.
- [34] S. Cohen and W. Money, “Establishing Smart City Technical Standards and Guidance,” in *Proceedings of the 26th International Conference on World Wide Web Companion - WWW '17 Companion*, 2017, pp. 1161–1166.
- [35] S. Benyahia, H. Houmani, and A. Namir, “MARSC,” in *Proceedings of the 2018 2nd High Performance Computing and Cluster Technologies Conference on ZZZ - HPCCT 2018*, 2018, pp. 90–97.
- [36] J. Li and N. Chen, “Geospatial sensor web resource management system for Smart City: Design and implementation,” *Proc. - 14th IEEE/ACM Int. Symp. Clust. Cloud, Grid Comput. CCGrid 2014*, pp. 819–827, 2014.
- [37] W. M. da Silva, A. Alvaro, G. H. R. P. Tomas, R. A. Afonso, K. L. Dias, and V. C. Garcia, “Smart cities software architectures,” in *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Applied Computing - SAC '13*, 2013, p. 1722.
- [38] M. Witt and D. Konstantas, “A secure and privacy-preserving internet of things framework for smart city,” *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*, pp. 145–150, 2018.
- [39] S. Munirathinam, *Industry 4.0: Industrial Internet of Things (IIOT)*, 1st ed., vol. 117, no. 1. Elsevier Inc., 2020.
- [40] S. N. Mahalank, K. B. Malagund, and R. M. Banakar, “Non functional requirement analysis in IoT based smart traffic management system,” *Proc. - 2nd Int. Conf. Comput. Commun. Control Autom. ICCUBE 2016*, 2017.
- [41] T. Jakobi *et al.*, “Evolving Needs in IoT Control and Accountability,” *Proc. ACM Interactive, Mobile, Wearable Ubiquitous Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 1–28, Dec. 2018.
- [42] S. Balakrishnan, H. Vasudavan, and R. K. Murugesan, “Smart Home Technologies,” in *Proceedings of the 6th International Conference on Information Technology: IoT and Smart City - ICIT 2018*, 2018, pp. 120–127.
- [43] H. Liu, C. Li, X. Jin, J. Li, Y. Zhang, and D. Gu, “Smart solution, poor protection: An empirical study of security and privacy issues in developing and deploying smart home devices,” *IoT S P 2017 - Proc. 2017 Work. Internet Things Secur. Privacy, co-located with CCS 2017*, no. I, pp. 13–18, 2017.
- [44] P. Arcaini *et al.*, “Smart home platform supporting decentralized adaptive automation control,” in *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on Applied Computing*, 2020, pp. 1893–1900.
- [45] T. Perumal, M. N. Sulaiman, N. Mustapha, A. Shahi, and R. Thinaharan, “Proactive architecture for Internet of Things (IoTs) management in smart homes,” *2014 IEEE 3rd Glob. Conf. Consum. Electron. GCCE 2014*, pp. 16–17, 2014.
- [46] A. Elsts, G. Oikonomou, X. Fafoutis, and R. Piechocki, “Internet of Things for smart homes: Lessons learned from the SPHERE case study,” *GloTS 2017 - Glob. Internet Things Summit, Proc.*, 2017.
- [47] A. Tzounis, N. Katsoulas, T. Bartzanas, and C. Kittas, “Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges,” *Biosyst. Eng.*, vol. 164, pp. 31–48, 2017.
- [48] A. Villa-Henriksen, G. T. C. Edwards, L. A. Pesonen, O. Green, and C. A. G. Sørensen, “Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential,” *Biosyst. Eng.*, vol. 191, pp. 60–84, 2020.
- [49] X. Li *et al.*, “Internet of Things to network smart devices for ecosystem monitoring,” *Sci. Bull.*, vol. 64, no. 17, pp. 1234–1245, 2019.
- [50] F. Al-Turjman and H. Altiparmak, “Smart agriculture framework using UAVs in the Internet of Things era,” in *Drones in Smart-Cities*, Elsevier, 2020, pp. 107–122.
- [51] C. Verdouw, H. Sundmaeker, B. Tekinerdogan, D. Conzon, and T. Montanaro, “Architecture framework of IoT-based food and farm systems: A multiple case study,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 165, no. July, p. 104939, 2019.
- [52] K. Gunasekera, A. N. Borrero, F. Vasuian, and K. P. Bryceson, “Experiences in building an IoT infrastructure for agriculture education,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 135, pp. 155–162, 2018.
- [53] R. S. Alonso, I. Sittón-Candanedo, Ó. García, J. Prieto, and S. Rodríguez-González, “An intelligent Edge-IoT platform for monitoring livestock and crops in a dairy farming scenario,” *Ad Hoc Networks*, vol. 98, p. 102047, Mar. 2020.
- [54] A. Sinha, G. Shrivastava, and P. Kumar, “Architecting user-centric internet of things for smart agriculture,” *Sustain. Comput. Informatics Syst.*, vol. 23, pp. 88–102, 2019.
- [55] A. G. Frank, L. S. Dalenogare, and N. F. Ayala, “Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 210, no. September 2018, pp. 15–26, Apr. 2019.
- [56] J. Cadavid, M. Alférez, S. Gérard, and P. Tessier, “Conceiving the model-driven smart factory,” in *Proceedings of the 2015 International Conference on Software and System Process - ICSSP 2015*, 2015, vol. 24–26-Aug, pp. 72–76.
- [57] D. Dhungana, A. Falkner, A. Haselböck, and H. Schreiner, “Smart factory product lines,” in *Proceedings of the 19th International Conference on Software Product Line - SPLC '15*, 2015, pp. 201–210.
- [58] J. Al-Jaroodi, N. Mohamed, and I. Jawhar, “A service-oriented middleware framework for manufacturing industry 4.0,” *ACM SIGBED Rev.*, vol. 15, no. 5, pp. 29–36, Nov. 2018.
- [59] T. Kramp, R. van Kranenburg, and S. Lange, *Introduction to the internet of things*. 2013.

Mejoramiento del uso de suelo en la agricultura mediante herramientas basadas en optimización

Improving land use in agriculture through optimization-based tools

Edgar Castillo¹, Oliver Delgado¹, Humberto De León¹, Luis Escartin¹, Yessica Saéz^{2,3}, Edwin Collado^{2,3*}

¹Licenciatura en Ingeniería Electromecánica – Centro Regional de Azuero – Universidad Tecnológica de Panamá

²Facultad de Ingeniería Eléctrica – Centro Regional de Azuero – Universidad Tecnológica de Panamá

³Centro de Estudios Multidisciplinario en Ciencias, Ingeniería, Tecnología–AIP (CEMCIT–AIP), Panamá

*Autor de correspondencia: edwin.collado@utp.ac.pa

RESUMEN– El uso adecuado de los recursos naturales en la agricultura representa hoy en día uno de los aspectos más importantes directamente relacionados con la seguridad alimentaria a nivel mundial. De esta necesidad surge la idea del uso de herramientas tecnológicas que permitan al productor utilizar de una manera eficiente los suelos agrícolas. Este trabajo propone el desarrollo de una herramienta basada en optimización para garantizar el uso adecuado del suelo, mientras se maximiza la ganancia del sistema de producción de alimentos. Específicamente, se considera un problema de optimización de programación lineal, donde se toman en cuenta variables tales como costo de inversión/costo por hectárea, capital inicial de inversión, área de siembra disponible, área sembrada de cada producto, y la ganancia neta por hectárea de cada producto. Los resultados obtenidos muestran que la herramienta propuesta alcanza un margen de ganancia mayor si se compara con la siembra empírica, utilizando siempre de manera eficiente el área de producción.

Palabras clave– Agricultura inteligente, manejo de suelo, Método Simplex, programación lineal, sistemas basados en optimización.

ABSTRACT– The proper use of natural resources in agriculture represents one of the most important aspects that are directly related to food security worldwide. From this need arises the idea of using technological tools that allow the producer to use agricultural soils efficiently. This work proposes the development of a tool based on optimization to guarantee the adequate use of the soil, while maximizing profits from the food production system. Specifically, a linear programming optimization problem is considered, where variables such as investment cost or cost per hectare, initial investment capital, available planting area, planted area of each product, and net profit per hectare of each product. The results obtained show that the proposed tool achieves a higher profit margin as opposed to using the seed empirically, always using the production area efficiently.

Keywords– Smart agriculture, soil management, Simplex method, linear programming, optimization-based systems.

1. Introducción

El cambio climático ha impactado de manera negativa al sector agropecuario en los últimos años, causando una reducción considerable de la producción de alimentos debido a afectaciones en el medio ambiente [1], [2]. Las variaciones no deseadas en los parámetros ambientales pueden impactar negativamente la seguridad alimentaria, las inversiones, la localización de los cultivos y actividades productivas y las familias que dependen de estas actividades [3].

En los últimos años, Panamá y otros países de la región Latinoamericana como Costa Rica, Nicaragua, Honduras y El Salvador, han presentado índices de producción y cosecha cada vez más bajos debido a problemas climáticos y el mal uso de recursos naturales, a pesar de que gran parte de sus territorios cuentan con características ambientales, hídricas y de suelo apropiadas para la producción agrícola [4]. Por ello, se ha impulsado el desarrollo de herramientas tecnológicas que ayuden a reducir los efectos del cambio climático,

Citación: E. Castillo, O. Delgado, H. De León, L. Escartin, Y. Saéz y E. Collado, “Mejoramiento del uso del suelo en la agricultura mediante herramientas basada en optimización”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 2, pp. (no modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 15 de septiembre de 2020. **Recibido con correcciones:** 18 de septiembre de 2020. **Aceptado:** 12 de enero de 2021.

DOI.

Copyright: 2021 E. Castillo, O. Delgado, H. De León, L. Escartin, Y. Saéz y E. Collado. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

mejorar producción de alimentos y reducir los costos de insumos y mano de obra y a una mejor toma de decisiones.

Ya que el suelo representa un recurso natural crucial para un sistema de cultivo al proporcionar el ecosistema necesario para la producción de alimentos saludables, se han hecho esfuerzos para adoptar medidas de adaptación al manejo de tierras agrícolas y así apoyar al agricultor a sacarle el mejor provecho a sus recursos e inversiones. Por ejemplo, los autores en [5] proponen un mecanismo para cuantificar el uso desproporcionado del suelo con el objetivo de ayudar a los encargados de formular políticas a optimizar las decisiones de gestión cuando se enfrentan a demandas de múltiples servicios bajo disponibilidad limitada de la tierra. En [6] los autores desarrollan un modelo basado en optimización lineal para la asignación óptima de recursos de tierra y agua con el fin de maximizar los retornos anuales netos de un área ubicada en el estado de Haryana de India. Los autores en [7] estudian un enfoque basado en optimización multiobjetivo para gestionar eficientemente las tierras agrícolas, mientras se reduce efectos de cambio climático. En el trabajo presentado en [8], los autores estudian distintas técnicas existentes para la selección de variables en el manejo de suelos agrícolas. Ellos también proponen un nuevo enfoque de selección variable, denominado MPCA-SC, basado en el uso combinado de la estadística de autocorrelación espacial bivariada de Moran y MULTISPATI-PCA.

Como se observa, se han propuesto varias técnicas de optimización para el cálculo de la asignación óptima del uso de la tierra dentro de un área. Sin embargo, la mayoría de estas técnicas están destinadas a seleccionar sitios óptimos para el uso de la tierra dentro de un área. Muchas de las aplicaciones mencionadas anteriormente se han relacionado con el uso de modelos de programación lineal, que han sido eficaces para ciertos tipos de problemas. Sin embargo, las tendencias recientes en la planificación del uso de la tierra han creado la necesidad de desarrollar diferentes tipos de algoritmos.

Bajo el enfoque de que las partes interesadas buscan respuestas inmediatas a sus aportes, para poder realizar ajustes de rapidez en sus planes, el presente trabajo propone una herramienta tecnológica basada en optimización para planificar el uso adecuado del suelo disponible, mientras se maximiza la ganancia del sistema de producción de alimentos. Esta herramienta está basada

en la programación lineal [9], considerando variables importantes como los costos de producción por productos, tiempos de siembras y cosecha de cada producto, capital inicial de inversión y cantidad de veces que se siembran en un año. El objetivo de este trabajo es desarrollar una herramienta que ayude a los productores a realizar una elección apropiada de los productos a sembrar, el porcentaje del área para esta siembra y los tiempos de producción de cada producto, permitiendo obtener mayores ganancias de su terreno disponible.

El resto de este trabajo está organizado de la siguiente manera. La sección 2 describe el modelo conceptual del sistema y la formulación del problema de optimización. La sección 3 muestra el escenario de estudio planteado para validar la herramienta basada en optimización propuesta para el manejo de suelos agrícolas. La sección 4 ilustra, a través de simulaciones, la funcionalidad y los beneficios del sistema propuesto y también se presenta un resumen de los resultados junto con importantes iniciativas de investigación que se considerarán en el futuro.

2. Formulación del Problema

El uso inadecuado de los suelos se debe principalmente al desconocimiento de las características del terreno y la falta de información sobre el mercado. Entre los problemas más comunes que se pueden encontrar está que los terrenos no son aprovechados adecuadamente porque se utilizan para sembrar un solo tipo de producto durante todo el año, quedando libre parte del terreno en distintos periodos. Por este motivo, el objetivo de la herramienta propuesta es maximizar la ganancia del sistema de producción al optimizar el uso del suelo agrícola, buscando siempre la compatibilidad de diferentes cultivos que pudiesen ser sembrados simultáneamente o en diferentes épocas del año. De esta manera el productor podría escoger entre las opciones de sembrar cierto producto en su totalidad en todo el terreno o varios productos al mismo tiempo para aprovechar el suelo al máximo, siempre respetando las restricciones impuestas en el problema de optimización.

Con esto se busca brindar una solución tecnológica que permita mejorar los sistemas de producción de alimentos al considerar desde un inicio parámetros importantes como la ganancia neta por hectárea de cada producto, el costo para producir una hectárea del producto, que depende mayormente de la tecnología

utilizada, variar factores como la cantidad de hectáreas disponibles y el capital inicial con el que se cuenta para iniciar el proyecto.

La figura 1 muestra un modelo conceptual de la herramienta propuesta en este trabajo.



Figura 1. Modelo conceptual del sistema de manejo óptimo de suelo agrícola.

Desde un inicio, el productor cuenta un acceso a información en tiempo real sobre la ganancia neta por hectárea de cada producto, el costo para producir una hectárea del producto, que depende mayormente de la tecnología utilizada, la cantidad de hectáreas disponibles, el capital inicial con el que se cuenta para el proyecto y el tipo de producto que desea producir. Con toda esta información, el productor ingresa los datos al sistema, el cual calcula, de manera rápida y eficiente, el porcentaje de suelo que debe utilizarse para cada producto durante el tiempo estipulado por el usuario. Con esto se busca brindar una solución tecnológica que permita mejorar los sistemas de producción de alimentos al considerar desde un inicio parámetros muy importantes que normalmente no son tomados en cuenta.

El sistema mencionado está diseñado basado en herramientas de optimización. Específicamente, se trata de un problema de optimización de programación lineal para optimizar el uso del suelo en sistemas de producción, mientras se maximiza su ganancia está dado por:

$$\text{Maximizar } \sum_{i=1}^N \alpha_i x_i \quad (1)$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^N x_i \leq K_{\max} A_{\text{total}} \quad (1.1)$$

$$K_{\min} A_{\text{total}} \leq \sum_{i=1}^N x_i \quad (1.2)$$

$$\sum_{i=1}^N c_i x_i \leq C_{\text{total}} \quad (1.3)$$

$$0 \leq x_i \leq k_i A_{\text{total}} \quad (1.4)$$

donde:

α_i es la ganancia neta por hectárea de cada producto i .

x_i es la cantidad de suelo agrícola asignada a cada producto i .

$K_{\max}$ es la cantidad máxima que puede utilizarse el área total de siembra durante un año.

A_{total} es el área total para la siembra durante un año.

$K_{\min}$ es la cantidad mínima que puede utilizarse el área total de siembra durante un año.

c_i es el costo para producir una hectárea del producto i .

k_i es la cantidad que puede ser sembrado el producto i durante un año en el terreno.

C_{total} es el costo estimado al inicio del periodo.

La idea en este problema (1) es maximizar la ganancia neta total al producir todos los alimentos en el suelo disponible, mientras se satisfacen las restricciones (1.1) donde la cantidad de suelo asignado no sobrepase la cantidad total de suelo disponible durante todo el periodo, (1.2) donde la cantidad de suelo asignado sea al menos un porcentaje dado de la cantidad total de suelo disponible durante todo el periodo, (1.3) donde el costo total de producción no sobrepase el costo estimado al inicio del periodo de siempre y (1.4) donde la cantidad de suelo asignado a cada producto no sobrepase la cantidad máxima necesaria durante todo el periodo.

3. Escenario de estudio

Después definir el problema de optimización para el manejo adecuado de suelos agrícolas, el siguiente paso corresponde a la creación de un escenario basándonos en datos de producción reales. Para ello, se utilizó información brindada por la plataforma del Ministerio de Desarrollo Agropecuario de Panamá (MIDA) [10], en

donde se pueden recopilar datos acerca de los tiempos de cultivo, la inversión inicial y las ganancias netas de distintos productos, entre otros. Los valores de las variables de ganancias netas e inversiones iniciales cambian constantemente, ya que dependen de la economía del momento y de las diversas formas de producir y cosechar los productos.

Como es de esperarse podemos encontrar una gran cantidad de escenarios distintos al modificar las distintas variables que conforman el problema (1). Por simplicidad, en este trabajo se realizó una investigación cuidadosa para seleccionar los productos más representativos en Panamá y así validar el funcionamiento de la herramienta propuesta. Se seleccionaron productos de siembra básicos en la región de Azuero de Panamá, la cuál es una de las de mayor producción agrícola de este país. Estos productos fueron el arroz, maíz, sorgo, y frijol. Una vez se definieron los productos, se procedió a identificar los tiempos de siembra y cosecha los mismos. Para ello, el estudio consideró la información de la Dirección Nacional de Agricultura del MIDA [10] que se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Calendario de siembra y cosecha de rubros agrícolas [10].

Rubo	Meses de siembra	Meses de cosecha
Arroz	Periodo I: abril y mayo Periodo II: junio, julio y agosto	Periodo I: agosto, septiembre, octubre Periodo II: noviembre, diciembre y enero
Maíz	Periodo I: mayo y junio Periodo II: agosto y septiembre	Periodo I: julio, agosto y septiembre Periodo II: diciembre, enero y febrero
Sorgo	septiembre, octubre y noviembre	enero, febrero y marzo
Frijol	Periodo I: abril, mayo y junio Periodo II: octubre y noviembre	Periodo I: julio, agosto y septiembre Periodo II: diciembre y enero

De esta información se pudo obtener comportamientos interesantes acerca de los tiempos de siembra y cultivo en Panamá para los productos en estudio. Como se observa, el arroz solo puede ser sembrado una vez al año, ya que ambos periodos de siembra de arroz no pueden ejecutarse simultáneamente en un solo terreno.

El sorgo es otro producto que solo puede producirse una vez al año debido a sus requerimientos de siembra y cosecha. Por el contrario, el maíz y el frijol son productos que pueden producirse dos veces al año si se programan adecuadamente las actividades de siembra y cosecha. De igual forma, también es importante considerar la compatibilidad que existe entre distintos productos para ser sembradas al mismo tiempo utilizando parte de área total disponible.

Para las variables de inversión inicial y ganancia neta por hectárea también se utilizaron datos proporcionados por MIDA [11]. El costo de producir una hectárea de algunos de estos productos varía según el método utilizado, los cuales pueden ser: método convencional con semilla importada, método convencional con semilla nacional, método convencional con semilla certificada, cero labranzas, mecanizado en seco, mecanizado con riego etc. La tabla 2 muestra un resumen, de los diferentes productos en base al método de producción empleado, de su ingreso por hectárea y su costo de producción por hectárea.

Tabla 2. Costo de producción e ingresos utilizando distintos métodos de siembra y cosecha [11]

Método de producción	Valor de producción por hectárea (\$)	Costo de producción por hectárea (\$)
Arroz		
Mecanizado en seco	392	2249
Mecanizado con riego	820	2468
Mecanizado con mina labranza	682	1904
Chuzo con tecnología	531	1000
Maíz		
Convencional Semilla Importada	357	1737
Convencional Semilla Nacional	334	1353
Convencional Semilla Certificada	205	1439
Cero Labranza Semilla Imp	358	1412
Frijol		
Aproximado	300	1000
Sorgo		
Aproximado	400	1500

En el caso del sorgo y el frijol se utilizaron valores promedios definidos por algunos productores, puesto que el MIDA no contaba con dicha información.

Por último, se definió el capital inicial con el que cuenta el productor, la cuál es una variable que depende únicamente del estado inicial del productor.

4. Simulación y resultados

Considerando la información presentada en las tablas 1 y 2, se propone el siguiente escenario para estudiar el rendimiento de la herramienta de manejo de suelo agrícola propuesta.

- Producto 1: Arroz
- Producto 2: Maíz
- Producto 3: Frijol
- Producto 4: Sorgo

Por lo tanto, el problema de optimización de programación lineal quedó planteado de la siguiente manera:

$$\text{Maximizar } \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_4 x_4 \quad (2)$$

$\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$

sujeto a:

$$0.75 A_{\text{total}} \leq x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \leq A_{\text{total}} \quad (2.1)$$

$$c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + c_4 x_4 \leq C_{\text{total}} \quad (2.2)$$

$$0 \leq x_1 \leq A_{\text{total}} \quad (2.3)$$

$$0 \leq x_2 \leq 0.5 A_{\text{total}} \quad (2.4)$$

$$0 \leq x_3 \leq A_{\text{total}} \quad (2.5)$$

$$0 \leq x_4 \leq 0.75 A_{\text{total}} \quad (2.6)$$

donde las variables α_i , c_i , A_{total} y C_{total} varían dependiendo el caso estudiado.

La simulación y análisis del problema propuesto en la sección anterior fue desarrollado utilizando la herramienta CVX, la cuál es un sistema de modelado basado en MATLAB para la optimización convexa. CVX convierte a MATLAB en un lenguaje de modelado, lo que permite especificar restricciones y objetivos utilizando la sintaxis de expresión estándar de MATLAB [12], [13].

En la tabla 3 se presentan varios escenarios considerados en este trabajo, obtenidos al variar la ganancia neta y la inversión por hectárea, donde se mantiene como

constante $K_{\min} = 0.75$, $K_{\max} = 1$, $A_{\text{total}} = 100$ hectáreas y $C_{\text{total}} = \$100,000.00$. Los datos observados se obtuvieron variando los parámetros presentados en las tablas 1 y 2.

Tabla 3. Escenarios para la producción de arroz, maíz, frijol y sorgo.

Producto	Ganancia neta por hectárea (\$/Ha)	Inversión por hectárea (\$/Ha)
Escenario 1		
Arroz	531	1300
Maíz	350	1312
Frijol	350	1200
Sorgo	400	1400
Escenario 2		
Arroz	350	1300
Maíz	350	1312
Frijol	350	1200
Sorgo	350	1400
Escenario 3		
Arroz	531	1250
Maíz	380	1250
Frijol	350	1250
Sorgo	400	1250
Escenario 4		
Arroz	350	1250
Maíz	350	1250
Frijol	350	1250
Sorgo	350	1250

La figura 2 muestra el resultado de la distribución óptima del suelo agrícola en el Escenario 1.

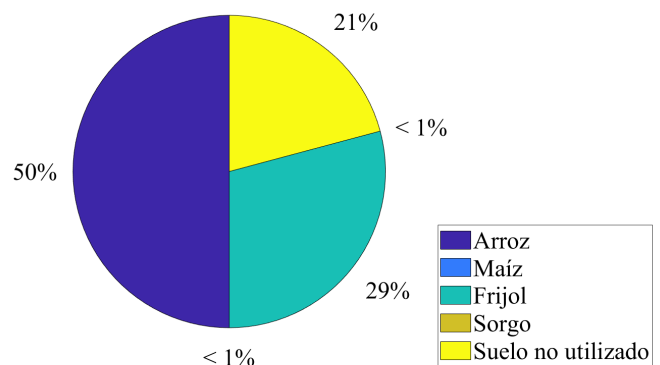


Figura 2. Gráfico de la distribución óptima del suelo agrícola en el Escenario 1 con datos de ganancia neta e inversión por hectárea aleatorios.

Se puede observar para el caso donde la ganancia neta y la inversión por hectárea son dinámicos, según datos reales del mercado productivo panameño, el sistema propuesto selecciona la mayor cantidad de suelo para los productos que presenta mayor ganancia y menor inversión por hectárea. En este escenario, el sistema asigna del área total de producción un 50% al arroz y un 29% al frijol, mientras que asigna un 21% de suelo para no ser utilizado. Esto garantiza que se obtenga la máxima ganancia para los datos considerados.

En la figura 3 se muestra el resultado de la distribución óptima del suelo agrícola en el Escenario 2. En este caso se considera una ganancia neta por hectárea uniforme para todos los productos y unos datos de inversión por hectárea son dinámicos. Para este escenario nuevamente el sistema decide producir solamente arroz y frijol, con la diferencia de que ahora la distribución del área total de producción es de 50% para el frijol y 31% para el arroz, dejando sin utilizar aproximadamente 19% del suelo. Con esto se puede observar que para este caso el sistema decide asignar el porcentaje del suelo en base a inversión por hectárea, el cual es el único dato variable.

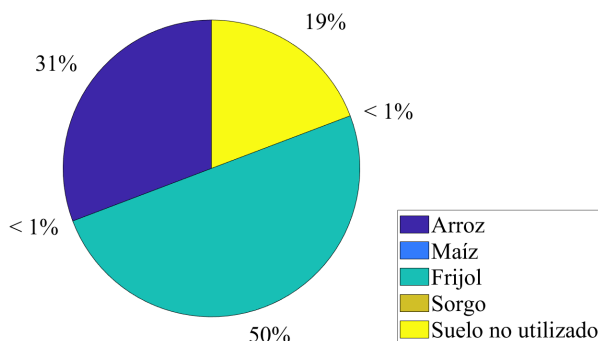


Figura 3. Gráfico de la distribución óptima del suelo agrícola en el Escenario 2 con ganancia neta por hectárea uniforme e inversión por hectárea dinámica.

En el escenario 3 se estudia el comportamiento del sistema cuando la ganancia neta por hectárea es dinámica según el mercado y la inversión por hectárea es uniforme para todos los productos. Como se observa en la figura 4, el sistema decide producir solamente arroz y sorgo, los cuales son los productos con mayor ganancia por hectárea. Específicamente, del área total se asignan 50% para el arroz y 30% para el sorgo, dejando sin utilizar aproximadamente 20% del suelo. A diferencia del escenario anterior, el sistema decide asignar el porcentaje

del suelo en base a la ganancia neta por hectárea, el cual es el único dato variable.

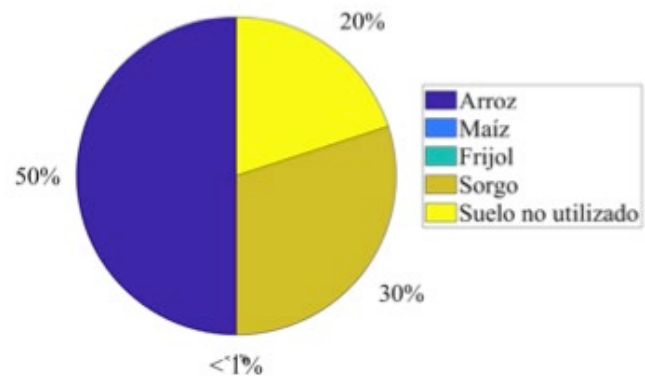


Figura 4. Gráfico de la distribución óptima del suelo agrícola en el Escenario 3 con ganancia neta por hectárea dinámica e inversión por hectárea uniforme.

En la figura 5 se presentan los resultados del escenario 4, donde ambos la ganancia neta por hectárea e inversión por hectárea son uniformes. Como se observa en la figura, para este caso el sistema decide producir los cuatro productos, asignando 12% al arroz, 28% al maíz, 12% a frijol y 28% al sorgo, dejando sin utilizar aproximadamente 20% del área total de producción. Al ser uniformes la ganancia neta por hectárea y la inversión por hectárea, el sistema decide la asignación del porcentaje de suelo en base a la cantidad que puede ser sembrado cada producto durante el periodo de producción en el terreno.

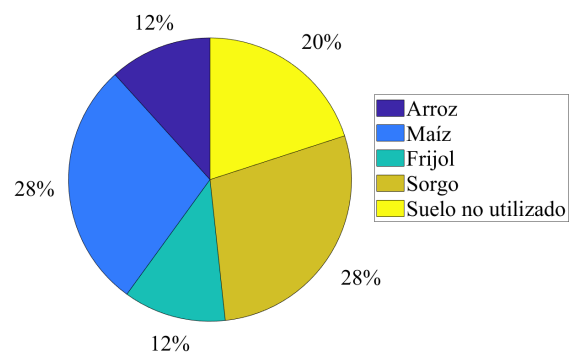


Figura 5. Gráfico de la distribución óptima del suelo agrícola en el Escenario 4 con ganancia neta por hectárea uniforme e inversión por hectárea dinámica.

Por último, la figura 6 muestra la ganancia máxima obtenida para cada escenario, donde se observa que el máximo valor fue obtenido cuando la ganancia neta por

hectárea es dinámica y la inversión por hectárea es uniforme. Es importante mencionar que la diferencia con respecto a los otros escenarios no fue muy representativa, lo cual permite brindar una flexibilidad al productor para variar escenarios según las necesidades que se presenten.

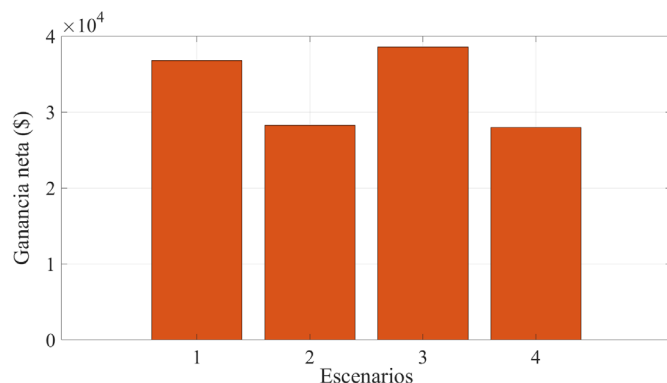


Figura 6. Ganancia máxima obtenida para cada escenario planeados y realizados.

5. Conclusiones

Las actividades agrícolas en muchas partes del mundo se realizan utilizando métodos tradicionales y empíricos, principalmente debido a la falta de tecnologías aplicadas en este sector. El uso de soluciones tecnológicas para la distribución adecuada de suelos a la hora de producir alimentos está tomando cada vez más interés, tanto por el sector agrícola como el sector de ciencia y tecnología. En este trabajo se propuso un sistema basado en optimización de programación lineal para mejorar el uso del suelo agrícola disponible, considerando siempre la ganancia neta y la inversión requerida de cada producto. Los resultados presentados demuestran que el sistema propuesto distribuye adecuadamente la utilización del suelo para distintos escenarios estudiados, garantizando siempre obtener la mayor ganancia y utilizar la mayor cantidad de terreno posible.

Sin duda la herramienta propuesta en este trabajo ayudará al productor a utilizar mejor el suelo disponible, garantizando siempre obtener la mayor ganancia posible. Una de sus principales ventajas es que es un sistema programable que permite variar distintos parámetros presentes en todo proceso de producción de alimentos sin importar el número de productos.

Como trabajo futuro se está trabajando en incluir más variables al problema de optimización para hacer que este se ajuste lo mejor posible a las necesidades reales de los productores de alimentos.

AGRADECIMIENTOS

Autor 6 y Autor 1 reconocen el apoyo del Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá al proporcionar financiamiento parcial para la publicación de este manuscrito a través de los contratos por subsidios económicos No. 200-2017 y No. 82-2019, respectivamente.

REFERENCIAS

- [1] M. A. Altieri y C. I. Nicholls, «Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas», *LEISA revista de agroecología*, vol. 14, pp. 5-8, 2009.
- [2] G. Nelson, J. Koo, R. Robertson, T. Sulser, T. Zhu, C. Ringler, S. Msangi y e. al., «Cambio climático: el impacto en la agricultura y los costos de adaptación. Política alimentaria. Informe», Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias, Washington, EUA, 2009.
- [3] A. G. Rodríguez, T. T. López, L. E. Meza y A. M. Loboguerrero, «Innovaciones institucionales y en políticas sobre agricultura y cambio climático: evidencia en América Latina y el Caribe», Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Santiago, Chile, 2015.
- [4] E. Collado, A. Fossatti y Y. Sáez, «Smart farming: A potential solution towards a modern and sustainable agriculture in Panama», *AIMS Agriculture and Food*, vol. 4, n° 2, pp. 266-284, 2018.
- [5] H. Setälä, R. D. Bardgett, K. Birkhofer, M. Brady, L. Byrne, P. D. Ruiter, F. D. Vries, C. Gardi, K. Hedlund, L. H. L y S. Hotes, «Urban and agricultural soils: conflicts and trade-offs in the optimization of ecosystem services», *Urban ecosystems*, vol. 17, n° 1, pp. 239-253, 2014.
- [6] A. S. Panda y S. Nath, «Development and application of an optimization model for the maximization of net agricultural return», *Agricultural water management*, vol. 115, pp. 267-275, 2012.
- [7] T. Klein, A. Holzkämper, P. Calanca, R. Seppelt y J. Fuhrer, «Adapting agricultural land management to climate change: a regional multi-objective optimization approach», *Landscape ecology*, vol. 28, n° 10, pp. 2029-2047, 2013.
- [8] A. Gavioli, E. d. Souza, C. Bazzi, L. C. Guedes y K. Schenatto, «Optimization of management zone delineation by using spatial principal components», *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 127, pp. 302-310, 2016.
- [9] S. Boyd, S. Boyd y L. Vanderberghe, *Convex Optimization*, Cambridge university press, 2004.
- [10] Ministerio de Desarrollo Agropecuario (MIDA) de Panamá, «Calendario», [En línea]. Available: <https://www.mida.gob.pa/upload/documentos/calendariosiembra%5B1%5D.pdf>. [Último acceso: 13 Marzo 2020].

- [11] Dirección de Agricultura, «Ministerio de Desarrollo Agropecuario de Panamá,» 2018. [En línea]. Available: https://www.mida.gob.pa/direcciones/direcciones_nacionales/direcci-n-de-agricultura/costos-de-producci-n-2018.html. [Último acceso: 23 04 2020].
- [12] S. Boyd y Y. Y. Michael Grant, «Disciplined convex programming,» de *Global Optimization*, Bosto, MA, Springer, 2006, pp. 155-210.
- [13] M. Grant, S. Boyd y Y. Ye, «CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming,» 2009. [En línea].

Simulación hidrológica de los impactos del cambio climático en la cuenca del río Caimito, La Chorrera, Panamá Oeste

Hydrological simulation of the impacts of climate change in the Caimito river basin, La Chorrera, Panama Oeste

Marta Moreno ^{1*}, Humberto Álvarez ², Angelo Chacón ³, Italo Biancheri ⁴

^{1*} Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de Panamá,

² Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de Panamá,

³ Licenciatura en Ingeniería Electromecánica, Universidad Tecnológica de Panamá,

⁴ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá.

*Autor de correspondencia: marta.moreno@utp.ac.pa

RESUMEN- Las precipitaciones altas ocasionan el aumento en la carga hídrica en la cuenca de los ríos, originando desbordamientos que propician situaciones de amenaza. La zonificación de la amenaza y la evaluación de la vulnerabilidad por inundación son procedimientos fundamentales para la toma de decisiones desde el punto de vista de la planificación de un territorio y los estudios para la mitigación y gestión del riesgo. Utilizando los insumos hidrológico e hidráulico, se obtiene información de profundidad y velocidad del flujo según las características de la pendiente. En este estudio se utilizaron las técnicas, procedimientos y herramientas propios de un Sistema de Información Geográfica (SIG), para conocer con exactitud las áreas de amenaza y vulnerabilidad por inundación, mediante el modelo de simulación hidráulica Hec-Ras, definiendo las cotas de inundación a través de perfiles transversales y modelado digital de terreno, con el propósito de realizar la zonificación de amenazas por inundación, que es una herramienta óptima para alcanzar un ordenamiento de la cuenca del Río Caimito, que permite la planificación estratégica de la cuenca y poder identificar la áreas de evacuación cuando se llegue a dar otro evento de inundación y así poder contribuir a la resiliencia de esa comunidad y que sirva como referencia a otros sectores.

Palabras claves— Resiliencia, vulnerabilidad, Modelado Hidrológico, Inundación, Riesgo de Inundación.

ABSTRACT— High rainfall causes an increase in the water load in the river basin, causing overflows that create threatening situations. Threat zoning and flood vulnerability assessment are fundamental procedures for decision-making from the point of view of planning a territory and studies for risk mitigation and management. Using the hydrological and hydraulic inputs, information on depth and flow velocity is obtained according to the characteristics of the slope. In this study, the techniques, procedures and tools typical of a Geographic Information System (GIS) were used, to know exactly the areas of threat and vulnerability due to flooding, using the Hec-Ras hydraulic simulation model, defining the flood levels through cross-sectional profiles and digital terrain modeling, in order to carry out the zoning of flood threats, which is an optimal tool to achieve a management of the Rio Caimito basin, which allows the strategic planning of the basin and to identify the evacuation areas when another flood event occurs and thus be able to contribute to the resilience of that community and serve as a reference to other sectors.

Keywords— Resilience, vulnerability, Hydrological Modeling, Flood, Flood Risk.

1. Introducción

Los impactos de las inundaciones alrededor mundo han generado pérdidas económicas y humanas, que han llevado a replantearse las prácticas de protección y gestión del riesgo, indagando en elementos de

vulnerabilidad social y el manejo de cuencas. Las prácticas de la reducción del riesgo se han encaminado hacia la generación de medidas que eviten los impactos y en acciones de adaptación a las condiciones durante y después de una inundación. Muchas medidas se han

Citación: M. Moreno, H. Álvarez, A. Chacón y I. Biancheri, “Estudio de Percepción Social en las vivencias post-desastre, para determinar el nivel de resiliencia y afectación comunitaria en el Distrito de La Chorrera, Provincia de Panamá Oeste,” *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 2, pp. (no modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 20 de febrero de 2021. **Recibido con correcciones:** 1 de julio de 2021. **Aceptado:** 1 de julio de 2021.

DOI.

Copyright: 2021 M. Moreno, H. Álvarez, A. Chacón y I. Biancheri. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

centrado en la formación de capacidades sociales para que la población tenga fortalezas de encarar un impacto y continuar posteriormente sus funciones; es decir, las acciones se encaminan a la formación de sociedades resilientes. Se ha comprobado que las poblaciones ubicadas en zonas inundables, como es el caso de las cuencas bajas de Tabasco, han sabido adaptarse a estas condiciones durante generaciones, al seguir habitando en dichos lugares. Sin embargo, desde tiempos prehispánicos cuando éstas ocurrían, los asentamientos humanos eran menos y la infraestructura podía rehabilitarse más fácilmente. Con el paso del tiempo, la población ha aumentado, generando más infraestructura, dañando los ecosistemas que protegen las cuencas, pero, sobre todo, olvidando prácticas de autoprotección y preservación [1][2].

Las inundaciones urbanas son un peligro natural crónico recurrente en términos del número de vidas pérdidas y el costo total de daños a la propiedad, infraestructura de obras públicas y recursos naturales. Las inundaciones representan aproximadamente un tercio de todos los desastres naturales en partes desarrolladas y en desarrollo del mundo. Las inundaciones también son responsables de más de la mitad de todas las muertes relacionadas con desastres y un tercio de la economía pérdidas de todas las catástrofes naturales. Por lo tanto, las inundaciones urbanas han sido consideradas como una amenaza emergente para las economías, las sociedades y la vida humana.

Se cree comúnmente que las inundaciones urbanas son inducidas por dos factores principales. Primero, rápido la urbanización ha inducido la alteración de la hidrología de cuencas hidrográficas a escalas de la ciudad [3], es decir, la tierra natural se convierte en superficies impermeables, lo que resulta en un proceso de infiltración debilitado [4] Segundo, el cambio climático ha causado patrones de precipitación para cambiar, es decir, la frecuencia y magnitud las tormentas han aumentado. Ambos factores han llevado a un aumento en los riesgos de generación de escorrentía e inundaciones urbanas y bajo estas circunstancias, las estrategias para la reducción de las inundaciones urbanas han atraído una atención creciente durante las últimas décadas los controles de inundación típicos dependen principalmente de la infraestructura gris convencional, incluidas las canaletas, alcantarillas pluviales, túneles, alcantarillas, cuencas de detención, tuberías y dispositivos mecánicos, que son utilizado colectivamente en un sistema para capturar y transmitir la escorrentía (USEPA, 2016). Sin

embargo, esta estrategia es propensa al fracaso, porque la carga de drenaje ha aumentado [5] [6].

Este antecedente indica la necesidad de un cambio en la estrategia de gestión de inundaciones, dejando que el simple análisis de costo-beneficio de las medidas estructurales de control de inundaciones y sus resultados asuman un enfoque de gestión del riesgo de inundación, para internalizar el riesgo residual describen el riesgo residual como el riesgo de falla del sistema estructural o la ocurrencia de una inundación mayor que la utilizada para diseñar el sistema de defensa. Además de las posibles fallas estructurales y la ocurrencia de eventos de mayor magnitud que el evento del proyecto, aún pueden ocurrir cambios en los patrones de variabilidad hidrológica, y la infraestructura de control de inundaciones no es más confiable para mitigar las incertidumbres de las inundaciones del proceso de cambio climático. El paso a seguir para crear y mantener ciudades que sean menos susceptibles a posibles daños por inundaciones es el reconocimiento y la internalización del riesgo residual en las estrategias de toma de decisiones que se adoptarán en la gestión de las aguas pluviales dentro de la gestión urbana. Para hacerlo posible, deben considerarse las diversas incertidumbres inherentes al proceso de inundación, como el cambio climático y las diferentes posibilidades de desarrollo urbano, incluido el crecimiento urbano incontrolado, como los barrios marginales [7] [8].

Comúnmente, la gestión de inundaciones hace frente al riesgo tratando de eliminarlo, y cuando la planificación urbana no considera las incertidumbres, se puede crear una falsa percepción del riesgo en la sociedad, lo que lleva a una exposición creciente de personas y propiedades. Por lo general, la eliminación del riesgo es imposible y poco práctico, por lo tanto, el objetivo de la gestión del riesgo no es su eliminación, sino la búsqueda de grados de riesgo residual adecuados y justificables. Para mantener un patrón aceptable de riesgo de inundación, las ciudades deben incorporar medidas de adaptación para permitir que la infraestructura urbana haga frente a los daños por inundación, considerando posibles cambios futuros en la probabilidad de eventos hidrológicos [9] [10].

2. Objetivos

- Simular los flujos de agua en el cauce natural del río, tomando en cuenta los efectos de las variaciones en ancho, profundidad, cobertura vegetal, presencia de obstáculos, puentes, cajones hidráulicos,

ramificaciones del cauce, zonas muertas, caídas, para simularla de una manera científica en comparación a los resultados anteriormente encontrados en campo.

- Determinar la extensión del área inundada y la profundidad máxima.
- Realizar un análisis de la inundación para determinar las áreas inundables y sujetas a deslizamientos que no puedan ser utilizadas para albergues temporales.
- Realizar un mapa de zonificación por inundación, que contribuya a la evacuación oportuna de los moradores en momento de un desastre.
- Analizar estos resultados dados por la simulación para planificar un plan de acción para aumentar la resiliencia comunitaria en este sector que sirva como referencia en otros puntos de interés.

2.1 Justificación:

En la última década el Gobierno de Panamá realizó 8 declaraciones de emergencia de alcance nacional/regional. En diciembre de 2010, prolongadas precipitaciones provocaron serias inundaciones, impactaron seriamente al país y llevaron a declarar la emergencia nacional.

Estas inundaciones dejaron a gran parte de la ciudad de Panamá sin agua potable por semanas y obligaron al cierre del tránsito en el Canal de Panamá.

La asignación de fondos por sector para la respuesta y rehabilitación después de estas inundaciones superó la cifra de US\$ 149 millones.

Como podemos observar las inundaciones, vendavales y los deslizamientos son las amenazas naturales más frecuentes y en este sentido, inundaciones, vendavales y los deslizamientos agrupan el 79% de todos los eventos reportados en la base de datos del Sistema de Inventario de Efectos de Desastres (DesInventar entre 1929 y 2015).

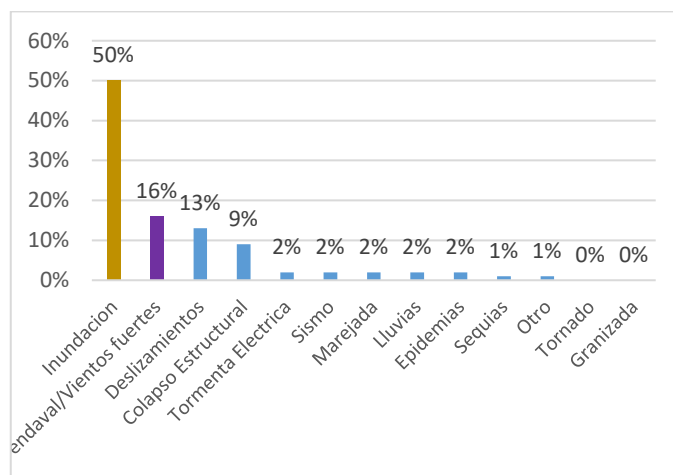


Figura 1. Estadísticas de amenazas naturales en Panamá (1929-2015)

Fuente: Base de datos del Sistema de Inventario de Efectos de Desastres (DESINVENTAR).

En este escenario Panamá al igual que cualquier otro lugar del mundo no puede considerarse exento de tener que enfrentar situaciones indeseables más graves que las descritas en el párrafo anterior. Y en estos casos donde se han ameritado planes de contingencia por parte del gobierno, así como de otras organizaciones han quedado descubiertos puntos críticos acerca de la organización y la comunicación entre los actores institucionales que participan en ellas, lo que afecta de manera directa el objetivo primordial de la logística humana, como es la recuperación de las personas afectadas [11].

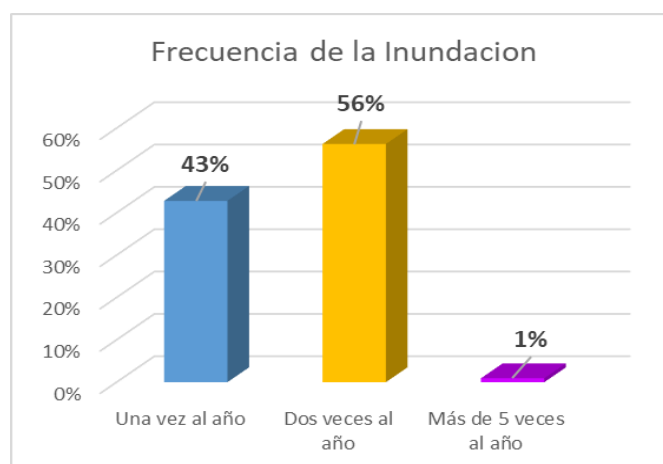


Figura 2. En esta imagen se aprecia que los residentes del área afectada expresan su preocupación que las inundaciones se dan con una frecuencia de dos veces al año, tomando como referencia la inundación ocurrida, ya que pueden existir eventos similares.

3. Metodología

3.1. Descripción del área de estudio

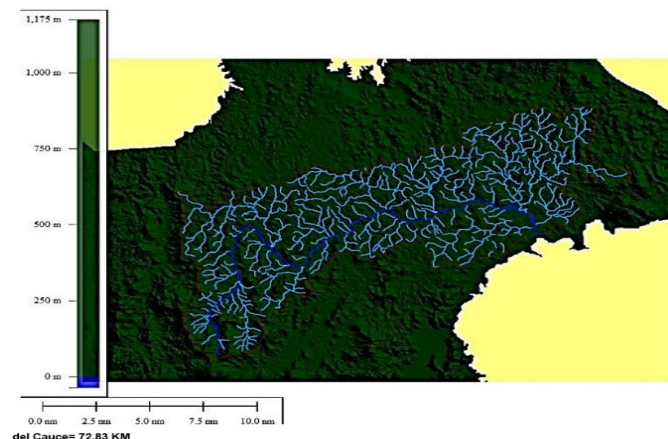


Figura 3. Cuenca del río Caimito, cuenca 140, cuenta con una extensión de 509 km² cuyo río principal es el río Caimito con una longitud de 72.83 Km.
Fuente: Ing. Manuel Arcia.

Panamá Oeste es una de las diez provincias de Panamá, creada el 1° de enero de 2014 a partir de territorios segregados de la provincia de Panamá ubicados al oeste del canal de Panamá. Está conformado por 5 distritos: Arraiján, Capira, Chame, La Chorrera y San Carlos; y un total de 58 corregimientos. Su capital es el Distrito de La Chorrera.

Limita al norte con la provincia de Colón, al sur con el océano Pacífico; al este con la provincia de Panamá y al oeste con la provincia de Coclé.

Cuenta con una extensión territorial de 2467.1 Km², para una población estimada en el 2014 de 518,013 habitantes y una densidad poblacional de 210 hab./Km² siendo una de las más altas a nivel nacional. El Distrito de Arraiján el de mayor densidad (1538.7hab./Km²) y Capira el de menor densidad (47.1hab./Km²) [11].

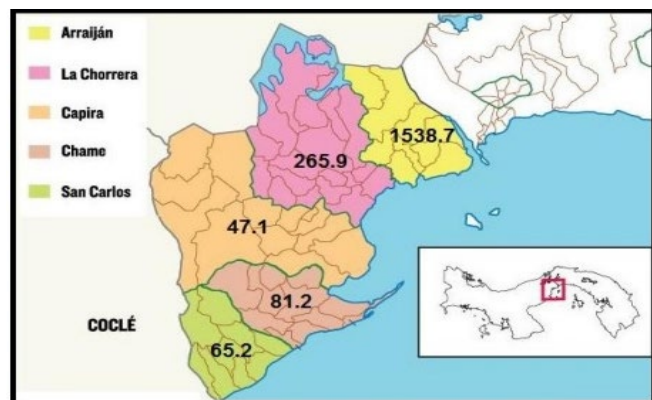


Figura 4. Densidad de población de Panamá Oeste, año 2014
Fuente: Sistema Regional de Salud Panamá Oeste. Departamento de Registros y Estadística de Salud.

3.2. Localización de la cuenca

La cuenca del río Caimito, cuenca 140, cuenta con una extensión de 509km² cuyo río principal es el río Caimito con una longitud de 72.83km y un perímetro de 185.75km. Sus afluentes más importantes son: el río Aguacate con sus afluentes río Cáceres, San Bernardino y Potrero, en el Distrito de Arraiján. En el distrito de la Chorrera se tienen afluentes importantes como son: Río Congo, Río Caimitillo y Río Martín Sánchez, en el Distrito de Capira, donde tiene el nacimiento el Río Caimito, el principal afluente es el Río Caimitillo, lo demás lo constituyen quebradas de menor importancia. La cuenca ocupa gran parte de los distritos de La Chorrera, Arraiján y una pequeña porción del Distrito de Capira. De los tres distritos, el de La Chorrera es el que tiene el mayor territorio, seguido del distrito de Arraiján y en menor proporción el distrito de Capira. El Distrito de La Chorrera, a pesar de ocupar el mayor territorio de la cuenca del río Caimito, la población se encuentra concentrada en la ciudad de La Chorrera. Aquí los corregimientos urbanos como Barrio Colón, Balboa y el Coco poseen la más alta densidad, alcanzando cifras que superan también los 1000 habitantes por kilómetro cuadrada [11].



Figura 5. Corregimientos dentro de la cuenca del Río Caimito
Fuente: Ing. Ricardo De León.

Según el artículo 23 de la ley 1 del 3 de febrero de 1994, establece: Las áreas que bordean los ojos de agua que nacen en los cerros en un radio de doscientos (200) metros, y de cien (100) metros si nacen en terrenos planos. Para este análisis utilizamos la cobertura de poblados al cual se le establece un buffer con un corredor

de 100 metros para verificar viviendas que se encuentran en esta área [11].

3.3 Ubicación del área de estudio

Mastranto final, ubicado en el corregimiento de Barrio Colón, Distrito de La Chorrera, es uno de los sitios de estudio que fueron más afectados por esta inundación, con 114 casas afectadas y un total aproximadamente de 470 personas afectadas [11].

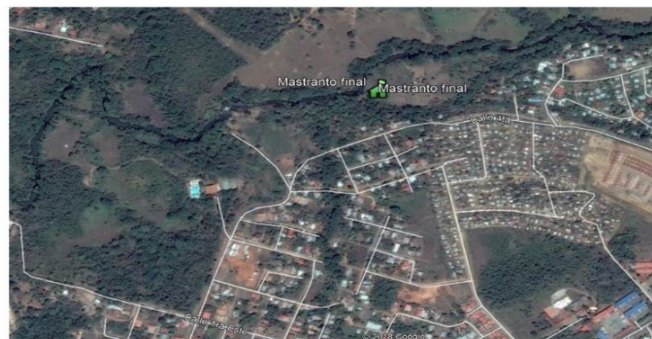


Figura 6. Ubicación satelital del área de Mastranto final
Fuente: Lic. Italo Biancheri.

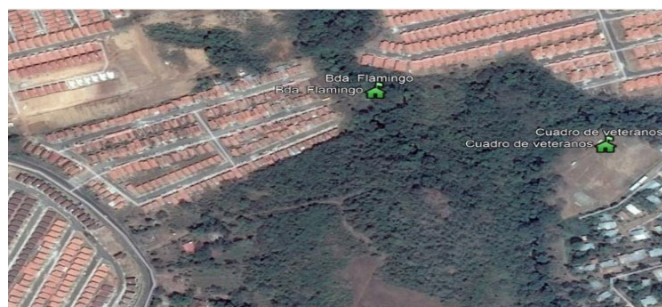


Figura 7. Ubicación Satelital de la barriada Flamingo y el Cuadro de Veteranos ubicados en el corregimiento de Barrio Balboa, Distrito El Trapichito.
Fuente: Lic. Italo Biancheri.

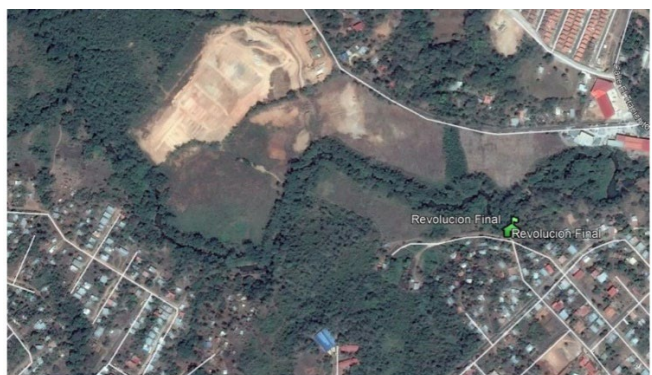


Figura 8. Ubicación satelital del área de Revolución Final ubicado en el Distrito del El Trapichito, Corregimiento de Barrio Balboa. **Fuente:** Lic. Italo Biancheri.



Figura 9. Ubicación del Puerto Caimito, Distrito de Puerto Caimito
Fuente: Lic. Italo Biancheri.

3.4 Justificación de Modelado Hidrológico

Las inundaciones son un fenómeno global que causa víctimas y pérdidas de propiedad en todos los continentes habitados. Probablemente sea los más desastres naturales devastadores, generalizados y frecuentes para los seres humanos sociedades. Por otro lado, el impacto de las inundaciones no siempre es negativo, ya que es parte de un ciclo natural y puede tener grandes beneficios ambientales y sociales, particularmente en áreas que han sufrido una sequía prolongada. Las inundaciones periódicas de socavación son incluso cruciales para los ecosistemas en la mayoría de los humedales ribereños y costeros. A lo largo de la historia de la humanidad, ha habido un esfuerzo constante por comprender, evaluar y predecir las inundaciones y su impacto. Por lo tanto, los modelos de inundación por inundación se desarrollan para cumplir este propósito. Dado que las inundaciones representan una proporción significativa del número total de desastres naturales notificados que ocurren en el mundo, y durante los últimos 30 años esta proporción ha ido en aumento, el desarrollo y la aplicación de modelos de inundaciones y la investigación se ha convertido en un esfuerzo global [12].

Los esfuerzos sistemáticos dentro de la comunidad de investigación desde la década de 1970 han mejorado enormemente la capacidad de modelar inundaciones. Los modelos se utilizan ampliamente en mapeo de riesgo de inundaciones, evaluación de daños por inundaciones, pronóstico de inundaciones en tiempo real, ingeniería relacionada con inundaciones y planificación de recursos hídricos, además de haber servido como un prerrequisito importante para investigar la erosión de las riberas de los ríos y el transporte de sedimentos en las llanuras aluviales, transporte de contaminantes, ecología de

llanuras aluviales, hidrología del sistema fluvial e hidrología de cuencas hidrográficas. Combinado con modelos climáticos, modelos hidrológicos y modelos de ríos, la aplicación de modelos de inundaciones se ha extendido a modelos que apuntan a formular estrategias de adaptación climática y mitigación de riesgos.

La simulación confiable y robusta de las características de las inundaciones también ha hecho posible planificar de manera efectiva los caudales ambientales para mantener ecosistemas acuáticos saludables [13].

En el último siglo, se acercaron a dos grupos que se acercaban un mayor enfoque y tema de la investigación actual: Métodos empíricos como mediciones, investigación, teledetección y modelos estadísticos que continuaron utilizando estos métodos basados en datos; y modelos hidrodinámicos. Estos últimos incluyen metodologías unidimensionales (1D) y metodologías tridimensionales (3D) simularon el movimiento del agua comparando las pérdidas asociadas con la aplicación de leyes físicas y el movimiento flotante con diversos grados de complejidad. En los últimos años, el tercer grupo de enfoques se ha vuelto cada vez más popular para modelos de resultados muy grandes (por ejemplo, para coordinar los riesgos de inundaciones a escala nacional) y regiones con datos insuficientes. Estos modelos pueden denominarse modelos conceptuales simplificados, se basan en una comprensión más modesta de los procesos físicos y su tiempo de ejecución es órdenes de magnitud más corto que el de los modelos hidrodinámicos. Son especialmente adecuados para grandes áreas de estudio y / o modelos estocásticos para la evaluación probabilística del riesgo de inundaciones donde a pesar de la investigación activa en esta área, el modelado de inundaciones rápido y preciso con alta resolución espacio-temporal sigue siendo un desafío importante en la investigación hidrológica e hidráulica. Esto se debe a la compleja y caótica tierra de las inundaciones y la incertidumbre que surge actualmente en el modelado de inundaciones [14] [15].

3.5 Modelado Hidrológico

Se realizó una simulación para el caudal de inundación del río caimito específicamente en el evento de inundación en noviembre de 2012.

❖ Sig Aplicado A La Extracción De La Topografía Tanto Del Cauce principal del tramo utilizando el método estándar de secciones transversales cada 100 m.

Programa Utilizado: ArcMap 10.6, Esri. Extensión Hecgeoras Para Arcgis 10.6 (Última Versión Disponible)

❖ Modelado Hidráulico Del Tramo Analizado.

Programa utilizado: Hec-Ras 5.0.7 (Hydrologic Engineering Center-River Analysis System).

❖ Sig aplicado al cálculo de la superficie de agua y la planicie de inundación. programa utilizado: Arcmap 10.5, ESRI. extensión Hec-Georas para Arcgis 10.6 SIG aplicado a la extracción de la topografía.

insumos:

❖ Imagen digital a colores. Fuente: World Imagery (WGS84) Service by ESRI. Imágenes Satelitales SPOT TerraColor de 15 m de precisión e imágenes satelitales SPOT para el mundo.

❖ modelo digital del terreno (DTM o Digital Terrain Model) de 5m de precisión. Fuente: IGN “Tommy Guardia”.



Figura 10. Imagen digital a colores del terreno estudiado
Fuente: Ing. Ricardo De León.



Figura 11. Esquemático del área del estudio realizado
Fuente: Ing. Ricardo De León.



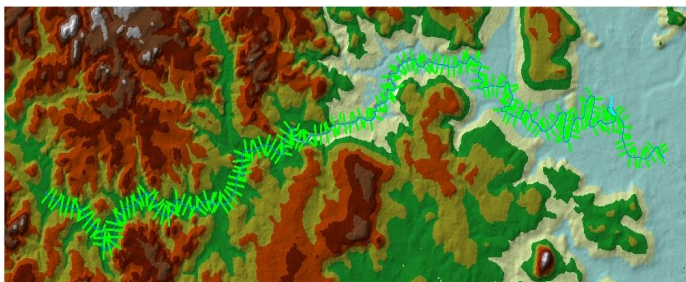
Figura 12. Las secciones transversales creadas son líneas rectas del editor de ArcMap.

Fuente: Ing. Ricardo De León.



Figura 13. Modelo digital del terreno (DTM)

Fuente: Ing. Ricardo De León



Elevation
 120.944 - 136
 105.889 - 120.944
 90.833 - 105.889
 75.778 - 90.833
 60.722 - 75.778
 45.667 - 60.722
 30.611 - 45.667
 15.556 - 30.611
 0.5 - 15.556

Figura 14. TIN (Triangulated Irregular Network) de elevaciones y coordenadas WGS84 de los puntos de cada sección transversal.

Fuente: Ing. Ricardo De León.

Condiciones de Borde para Flujo Permanente.

- ❖ Profundidad Normal.
- ❖ Pendiente Ponderada del tramo.

❖ Datos de Flujo

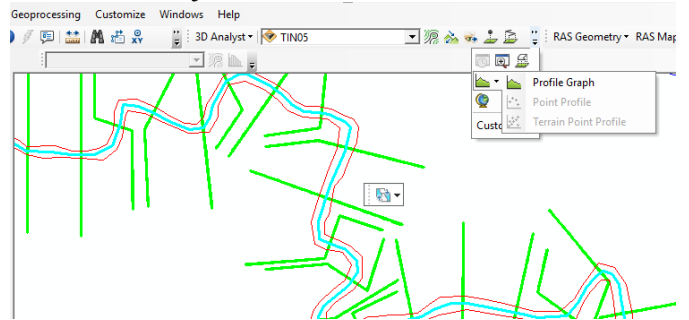


Figura 15. Editor de ArcMap de las secciones transversales

Fuente: Ing. Ricardo De León.

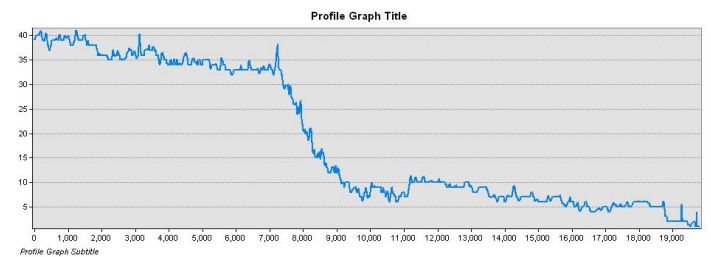


Figura 16. Perfil longitudinal para el cálculo de la pendiente única representativa del tramo

Fuente: Ing. Ricardo De León

Diferencia de Elevación: 40 metros

Longitud del Tramo: 20 Km

Pendiente: 0.002

4. Resultados

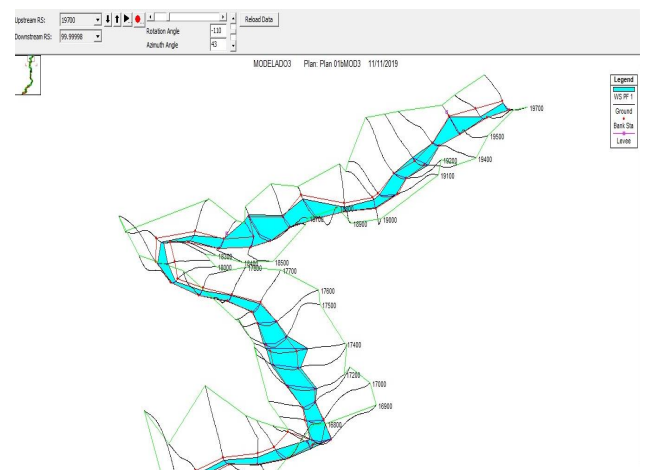


Figura 17. Resultados del Hec-Ras

Fuente: Ing. Ricardo De León

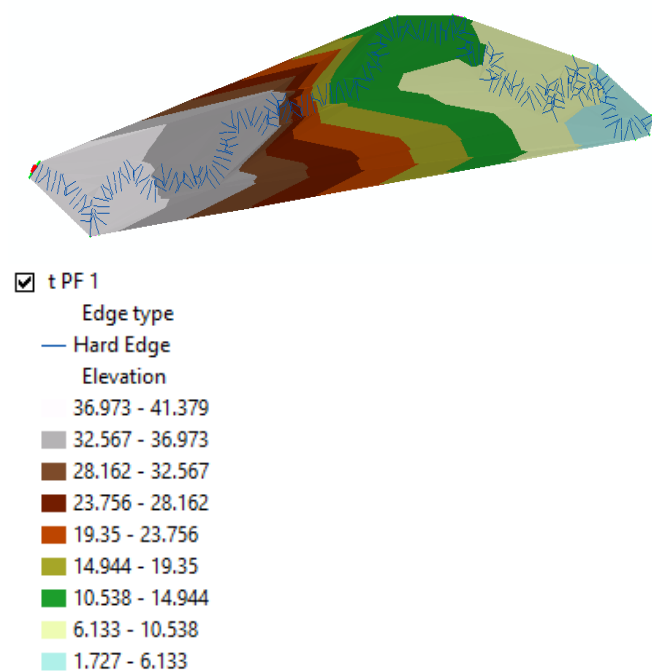


Figura 18. Superficie de agua generada, la cual muestra las elevaciones máximas del agua con respecto al NMM en los diferentes puntos del terreno inundado.

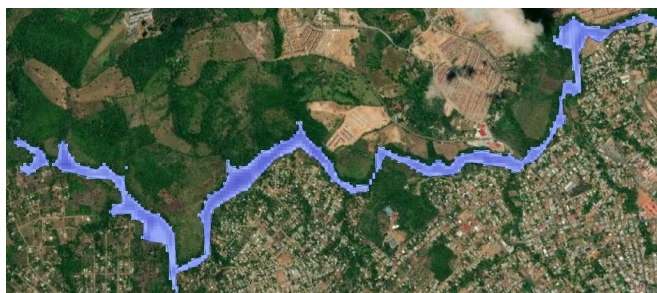


Figura 19. Planicie de Inundación Generada presentando las profundidades de agua por encima del terreno inundado. Comparación de los resultados de la Simulación con los registros fotográficos del evento real de noviembre de 2012.



Figura 20. Punto 1. El Trapichito: Barriada el Campesino-Toma de Agua IDAAN Barriada El Campesino Toma de Agua. Tanto la simulación como la fotografía muestran la salida del río de su cauce natural.



Figura 21. Punto 2. El Trapichito: Los Flamingos. Tanto la simulación como la fotografía muestran la salida del río de su cauce natural afectando el área de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.



Figura 22. Punto 3. Maribel-Villa Diana-El Machetazo-Monte Limar-Autopista.

Posibles causas de la diferencia:

- La inundación en Villa Diana, a un costado del Puente Maribel pudo haberse debido a obstrucciones (árboles caídos, objetos grandes arrojados al río o arrastrados por éste, etc.) más allá de la que representa dicho puente con sus estribos y columnas inferiores.
- La inundación en el Machetazo, el antiguo On the Run y en Parque Hato Montaña, la cual obstruyó la vía interamericana, se debió a la contribución de una quebrada que no fue contemplada en el tramo analizado, pero recorre el área afectada.

6. Conclusiones

- Existieron coincidencias entre la extensión de la planicie de inundación en el área de interés del estudio: El Trapichito, a pesar de haberse realizado un modelado de flujo permanente en lugar de flujo inestable que se ajusta más a las condiciones del fenómeno estudiado.
- Se pudo simular, con una mayor coincidencia a la esperada, un fenómeno natural tan complicado, a pesar de haberse utilizado un DTM de precisión 5m y una imagen digital reciente, teniendo presente que el evento sucedió en 2012 y el río Caimito ha sido dragado variando las condiciones geométricas del

cauce existentes al momento del evento. Además de haberse despreciado los efectos de 4 puentes existentes: Trapichito, Puente Velásquez, Puente Maribel y Puente Autopista, ya que no representaron impedimento alguno para la crecida.

5. Conclusiones y recomendaciones

- Los poblados alrededor de la cuenca del Río Caimito es un área de frecuentes inundaciones que provocan daños recurrentes sobre la infraestructura y actividades económicas, como las ocurridas en los años 2006, 2010, 2012 e incluso en el 2018.
- Una vez obtenido los resultados de este modelado hidráulico, podemos realizar La zonificación de amenazas por inundación que nos permitirá la planificación estratégica de la cuenca del Río Caimito, por medio de la identificación de las unidades o formas geomorfológicas propias de la llanura aluvial y su potencial inundable. para dar a conocer a la población los lugares seguros producto de esta investigación para que así se puedan salvar más vidas y aumente la resiliencia comunitaria frente a estas y otras inundaciones venideras.
- La obtención de los períodos de retorno de las áreas inundables sirve como base para la planificación física del territorio. En función del nivel de amenaza es posible planificar la densidad del uso del suelo, un ejemplo claro es el caso del poblado que este alrededor de la Cuenca del Río Caimito, el cual tiene una inapropiada ubicación debido al alto potencial de inundación que este presenta.
- La inundación ocurrida en el 2012 reafirma la utilidad que tiene esta herramienta para evitar que se presente este tipo de desastre de manera recurrente.

Se recomienda posteriormente este estudio de modelado hidrológico, generar un mapeado de las zonas de riesgo para dar a conocer a la población los lugares seguros producto de esta investigación para que así se puedan salvar más vidas y aumente la resiliencia comunitaria frente a estas y otras inundaciones venideras.

REFERENCIAS

- [1] A. D. Nobre *et al.*, «Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model», *J. Hydrol.*, vol. 404, n.º 1, pp. 13-29, jun. 2011, doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.051.
- [2] F. Karim *et al.*, «Assessing the impacts of climate change and dams on floodplain inundation and wetland connectivity in the wet-dry tropics of northern Australia»,

- J. Hydrol.*, vol. 522, pp. 80-94, mar. 2015, doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.12.005.
- [3] K. Beven, «Changing ideas in hydrology — The case of physically-based models», *J. Hydrol.*, vol. 105, n.º 1, pp. 157-172, ene. 1989, doi: 10.1016/0022-1694(89)90101-7.
- [4] G. Le Cozannet *et al.*, «Evaluating uncertainties of future marine flooding occurrence as sea-level rises», *Environ. Model. Softw.*, vol. 73, pp. 44-56, nov. 2015, doi: 10.1016/j.envsoft.2015.07.021.
- [5] G. Arduino, P. Reggiani, y E. Todini, «Recent advances in flood forecasting and flood risk assessment», *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 9, n.º 4, pp. 280-284, oct. 2005, doi: <https://doi.org/10.5194/hess-9-280-2005>.
- [6] J. J. Monaghan, «Smoothed Particle Hydrodynamics», *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 30, n.º 1, pp. 543-574, sep. 1992, doi: 10.1146/annurev.aa.30.090192.002551.
- [7] S. Marriott, «Textural analysis and modelling of a flood deposit: River severn, U.K.», *Earth Surf. Process. Landf.*, vol. 17, n.º 7, pp. 687-697, 1992, doi: <https://doi.org/10.1002/esp.3290170705>.
- [8] S. Blazkova y K. Beven, «Uncertainty in flood estimation», *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 5, n.º 4, pp. 325-332, ago. 2009, doi: 10.1080/15732470701189514.
- [9] K. Beven, «Distributed Models and Uncertainty in Flood Risk Management», en *Flood Risk Science and Management*, John Wiley & Sons, Ltd, pp. 289-312.
- [10] B. Merz, H. Kreibich, R. Schwarze, y A. Thieken, «Review article “Assessment of economic flood damage”», *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 10, n.º 8, pp. 1697-1724, ago. 2010, doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1697-2010>.
- [11] M. Moreno, H. Álvarez, y A. Chacón, «Estudio de percepción social en las vivencias postdesastre, para determinar el nivel de resiliencia y afectación comunitaria en el distrito de La Chorrera, provincia de Panamá Oeste», *ID Tecnológico*, vol. 16, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2020, doi: 10.33412/idt.v16.1.2432.
- [12] M. Mure-Ravaud, G. Binet, M. Bracq, J.-J. Perarnaud, A. Fradin, y X. Litrico, «A web based tool for operational real-time flood forecasting using data assimilation to update hydraulic states», *Environ. Model. Softw.*, vol. 84, pp. 35-49, oct. 2016, doi: 10.1016/j.envsoft.2016.06.002.
- [13] M. B. Abbott, J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O’Connell, y J. Rasmussen, «An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system», *J. Hydrol.*, vol. 87, n.º 1, pp. 45-59, oct. 1986, doi: 10.1016/0022-1694(86)90114-9.
- [14] P. A. Sleight, P. H. Gaskell, M. Berzins, y N. G. Wright, «An unstructured finite-volume algorithm for predicting flow in rivers and estuaries», *Comput. Fluids*, vol. 27, n.º 4, pp. 479-508, may 1998, doi: 10.1016/S0045-7930(97)00071-6.
- [15] F. Pappenberger, K. Beven, M. Horritt, y S. Blazkova, «Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations», *J. Hydrol.*, vol. 302, n.º 1, pp. 46-69, feb. 2005, doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.06.036.

Estudio del efecto ambiental industrial y marino sobre concreto reforzado expuesto en dos ciudades del pacífico panameño

Study of the industrial and marine environmental effect on reinforced concrete exposed in two cities in the Panamanian Pacific

Alda de Sánchez^{1*}, Cecilio Hernández²

¹ Facultad de Ingeniería Civil - Centro Regional de Panamá Oeste, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.

² Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales (LABAICA), Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: alda.cedeno@utp.ac.pa

RESUMEN. El océano pacífico baña la costa sur de la nación panameña en su totalidad y gran parte de las construcciones importantes se ubican paralelas a esta. La investigación tiene el objetivo de examinar, cualitativamente, el perfil del concreto reforzado desde la superficie hasta cuatro centímetros de profundidad de losas de concreto reforzado expuestas naturalmente por un año a ambientes influenciados por aerosoles de tipo marinos y marino – industrial, ambos sitios se ubican aproximadamente a 20km del litoral. Los resultados obtenidos por espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FTIR), microscopía electrónica de barrido (SEM) y medición de potencial se compararon con los obtenidos en una losa patrón resguardada en ambiente controlado. Los resultados nos llevan a concluir que la influencia marino-industrial tiene más afectación sobre el concreto reforzado. Para continuar la investigación, estos resultados se compararán con muestras de concreto de las mismas características de fabricación y exposición, pero ubicadas en el litoral atlántico. Estamos seguros de que la información suministrada representa un valioso aporte al sistema constructivo de losas de concreto reforzado.

Palabras clave- Exposición ambiental, espectroscopía infrarroja de Fourier, concreto reforzado.

ABSTRACT. The Pacific Ocean bathes the southern coast of the Panamanian nation in its entirety and many of the important buildings are located parallel to it. The research aims to examine, qualitatively, the profile of reinforced concrete from the surface up to four centimetres deep of reinforced concrete slabs naturally exposed for one year to environments influenced by marine and marine – industrial aerosols, both sites are located approximately 20km from the coast. Results from Fourier's infrared transform spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM) and potential measurement were compared to those obtained in a pattern slabs guarded in a controlled environment. The results lead us to conclude that marine-industrial influence has more impact on reinforced concrete. To continue with the research, these results will be compared with concrete samples of the same manufacturing and exposure characteristics but located on the Atlantic coast. We are confident that the information provided represents a valuable contribution to the construction system of reinforced concrete handles.

Keywords- Environmental exposure, Fourier infrared spectroscopy, reinforced concrete.

1. Introducción

El concreto u hormigón es un material que se caracteriza principalmente por su alta resistencia. Sin embargo, no está exento de daños, entre ellos, los ocasionados por el ambiente alrededor suyo cargado de cloruros, sulfatos, carbonatos que desencadenan en la corrosión del acero de refuerzo. La problemática ambiental surgida por la proximidad de las

construcciones a la costa y a ambientes industriales toma cada día más importancia en los costos de mantenimiento y reparación de las estructuras de hormigón armado. La corrosión del acero de refuerzo es un de las principales preocupaciones de los especialistas en construcción.

Existen algunos estudios donde sugieren que la ubicación geográfica de la edificación juega un papel importante en el deterioro por cloruros de acuerdo con la

Citación: A. Sánchez y C. Hernández, “Estudio del efecto ambiental industrial y marino sobre concreto reforzado expuesto en dos ciudades del pacífico panameño”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 2, pp. (), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 28 de febrero de 2021. **Recibido con correcciones:** 28 de julio de 2021. **Aceptado:** 3 de julio 2021.

DOI.

Copyright: 2021 A. Sánchez y C. Hernández. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

concentración de las sales presentes en el agua que invade a la estructura por diferentes medios. Otros sugieren medir cualitativamente el perfil de cloruros en el concreto [1], [2], [3]. El problema de los contaminantes sobre el concreto es complejo; por lo que se aproximan los resultados finales.

En la construcción podemos encontrar losas de concreto diseñadas tomando en cuenta excelentes tecnologías para evitar la corrosión del acero embebido en hormigón. Sin embargo, existen condiciones y especificaciones en cuanto al uso del concreto que sirven de referencia en el diseño de la mezcla tales como humedad, ambiente al que se expondrá, resistencia a la compresión especificada, asentamiento tamaño de agregado, tipo de cemento y relación agua/cemento que garanticen la durabilidad del elemento de concreto.

Para el diseño y ensayos desarrollados se ha considerado elaborar losas que se expondrán a la humedad, en ambiente severo de exposición marino y marino-industrial, con resistencia a la compresión de 4000lb/pulg² a los 28 días, sin aditivos, con asentamiento entre 25mm y 75mm, el tipo de cemento es HE (alta resistencia a edades tempranas) según ACI 211.

En la investigación se propone diseñar losas de concreto reforzadas en ambas direcciones y estudiar el comportamiento de éstas a ambientes marinos y marino-industrial para valorar su respuesta a corrosión frente a los contaminantes existentes en su entorno, con el propósito de aportar nueva información que pueda ser considerada al momento del diseño del hormigón.

El sistema de muestreo y análisis de laboratorio tiene el objetivo de observar la tendencia y los perfiles de reacciones del concreto sometido a diferentes climas para evaluar si el material estudiado ha reaccionado según lo esperado.

Con el propósito de comprender los límites y el alcance de la investigación, los ensayos aplicables y el sistema de monitoreo se realizó una revisión bibliográfica del estado del arte respecto, entre otros, al efecto del ambiente sobre el concreto, la hidratación del cemento, los contaminantes que afectan al hormigón, los métodos de ensayos aplicables al análisis del perfil del concreto y la corrosión del acero embebido en el concreto [2], [3], [4], [5], [6].

Seguidamente, se presentan el proceso de investigación y análisis de los resultados enfatizando en la observación de la tendencia y los perfiles de reacción del concreto a partir de las sugerencias de las referencias bibliográficas revisadas.

Por último, exponemos las conclusiones de la investigación realizada.

2. Materiales y metodología

A partir del estado del arte se procedió a escoger el sistema de muestreo y ensayos de laboratorios más convenientes para la recolección y análisis de los datos. La validación de los resultados consistió en la comparación con una losa patrón colocada en condiciones ambientales controladas. Es por ello por lo que, hemos considerado el estudio de muestras de concreto reforzado expuestas por un año en ambientes diferentes, situados aproximadamente a 20km de la costa pacífica, con el objetivo de dar seguimiento al proceso de hidratación del cemento y corrosión del acero de refuerzo en un año de exposición ambiental. El plan de monitoreo incluye dos estaciones con características ambientales diferentes que serán contrastadas con una muestra patrón. La primera se encuentra en la ciudad de Penonomé con relativa presencia de árboles y densidad media de construcciones y la otra en la ciudad de Tocumen situada en un ambiente industrializado. Se diseñó un concreto con relación agua/cemento igual a 0.4, f'c de 4000 lb/pulg², agregado grueso 3/8 de pulgadas y arena tamaño máximo 6mm, armado en dos direcciones. Los análisis presentados en este artículo, además de los tradicionales, consisten en espectroscopía infrarroja de Transformada de Fourier y medición de potencial de media celda [3], [4], [5], [6], [7], [8]. El aporte significativo de los resultados estriba en que las muestras situadas en el ambiente industrial se vieron más afectadas.

Posteriormente, las losas fueron confeccionadas con medidas de 0.6m X 0.6m X 0.15m, armadas en dos direcciones con barras de acero # 5, curadas por 28 días. Se midió el potencial de corrosión antes de colocarlas en las estaciones de monitoreo por un año con el fin de estudiar su comportamiento en ese periodo.

3. Resultados y discusión

A partir de las losas expuestas, los estudios sobre la penetración del ion cloruro en el concreto fueron hechos midiendo cualitativamente el perfil del cloruro a través de la profundidad del concreto, desde la superficie hasta cuatro cm en su interior. Recordemos que la exposición de las muestras se dio en condiciones naturales de uso por un año y la data del experimento fue comparada con los resultados de la losa patrón.

La tendencia y los perfiles de reacciones del concreto en tiempo real fueron observados mediante varios métodos, siendo uno de ellos el uso de la espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FTIR). Para ello, el rango de número de onda estudiado es de 4000cm^{-1} a 500cm^{-1} . La hidratación del cemento se da en cinco etapas. Las primeras tres ocurren en un periodo aproximado de siete horas, desde que el cemento hace contacto con el agua hasta que fragua. Allí se forma $\text{Ca}(\text{OH})_2$, etringita, y el silicato tricálcico. En la cuarta etapa la pasta endurece, se consume el yeso y la etringita se convierte en mono sulfato. A partir de este momento, ocurre un proceso difusivo y la pasta continúa hidratándose, pero en forma lenta [3]. Entonces, la investigación se centra en el proceso difusivo por un año. Es por ello por lo que, a partir de la figura 1 a la 4 analizaremos algunos números de onda cuya formación de picos nos dará a conocer la posibilidad de la formación o no de productos de la hidratación del cemento en un año.

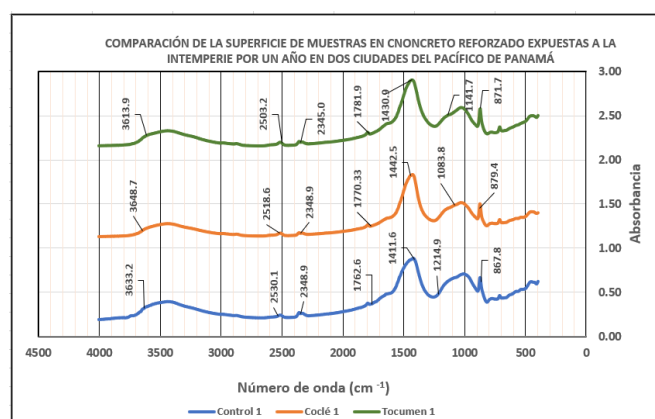


Figura 1. Espectro de la superficie de las muestras de concreto expuestas por un año.

El análisis por FTIR aquí presentado nos da indicio de los productos y los mecanismos de la hidratación que se forman en el proceso de difusión o en el periodo posterior al fraguado del concreto.

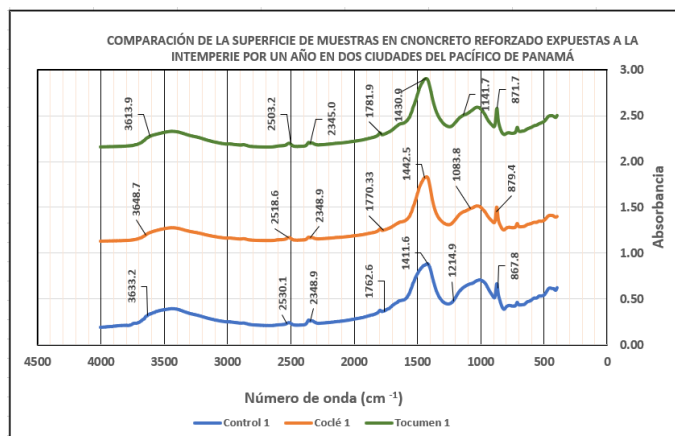


Figura 2. Espectro a dos cm de profundidad de las muestras de concreto expuestas por un año.

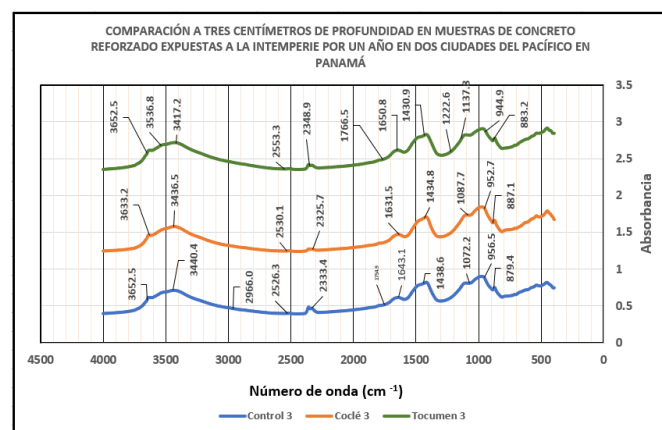


Figura 3. Espectro a tres cm de profundidad de las muestras de concreto expuestas por un año.

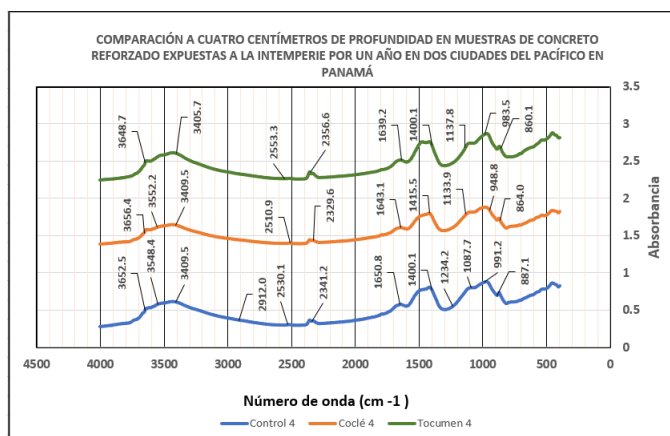


Figura 4. Espectro a cuatro cm de profundidad de las muestras de concreto expuestas por un año.

El primer número de onda que veremos es la de 3643cm^{-1} en donde se da la formación del hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). En la superficie no se evidenció la existencia de este producto, mientras que, a dos

centímetros de profundidad las muestras patrón y Penonomé presentan evidencia de la existencia y a los tres centímetros todas las muestras exhiben presencia del producto estudiando. A los cuatro centímetros la muestra Tocumen es más crítica.

El segundo número de onda es la de 3550cm^{-1} en donde se da la formación del Yeso. A un año de exposición ninguna de las muestras a ninguna profundidad mostró evidencia de la existencia de este producto.

El tercer grupo de números de ondas estudiadas lo componen 1796cm^{-1} , 2513cm^{-1} , 2875cm^{-1} , 2983cm^{-1} , y $1350\text{--}1550\text{cm}^{-1}$. En estas se da la formación del carbonato de calcio y en la superficie de las tres muestras estudiadas se observó solo un pico importante en el número de onda 1700cm^{-1} que evidencia su existencia.

La formación de los carbonatos se da en los números de onda 1428cm^{-1} , 878cm^{-1} , 736cm^{-1} . En la superficie se evidencian picos importantes en todas las muestras, siendo la muestra Tocumen la más crítica y a medida que se profundiza en el concreto, las intensidades de los picos bajan en todas las muestras.

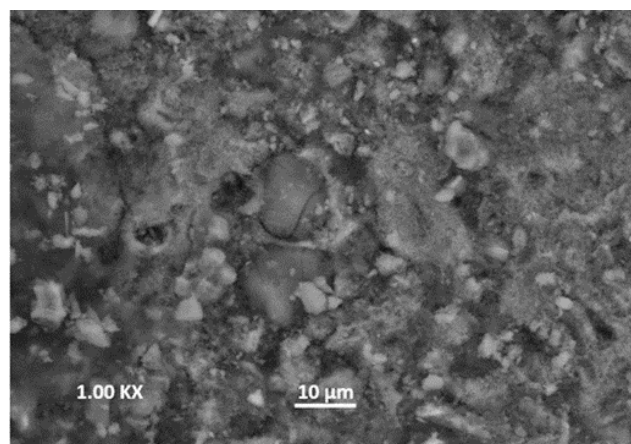
En los números de onda $970\text{--}1100\text{cm}^{-1}$ se da la formación de Silicato de calcio hidratado (C-S-H). En este rango, todas las muestras presentaron picos considerables a través de los cuatro centímetros de profundidad analizados. Sin embargo, Tocumen fue la más crítica.

Por último, tenemos el número de onda 1225cm^{-1} en la cual aparece la etringita. En ninguna de las muestras presentó formación de pico importante que evidenciara la formación de este producto.

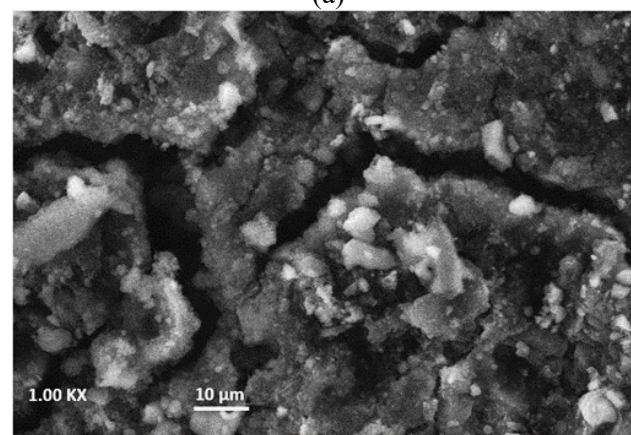
El análisis anterior nos sugiere que el proceso de Carbonatación de la estación Tocumen (ambiente marino-industrial) es mayor, y esto explica por la alta densidad de tráfico terrestre e incluso aéreo del sitio acompañado de aerosoles marinos.

Con el objetivo de complementar los resultados por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, el uso microscopia electrónica de barrido (SEM) permiten evaluar el perfil del concreto mediante fotografías las cuales están en el orden de las micras o millonésima parte de un metro [9], [10]. En la figura 5 se muestran fotografías en el orden de $10\mu\text{m}$ de la superficie del concreto de la muestra: (a) patrón, (b) Penonomé y (c) Tocumen. Al compararlas vemos que todas las muestras presentan una morfología diferente. La muestra patrón (a) presenta una matriz hidratada, con cristales hexagonales, con poros y microfisuras. En lo que respecta a la muestra Penonomé (b) presenta cristales hexagonales y aciculares, fisuras de ancho de $10\mu\text{m}$ y

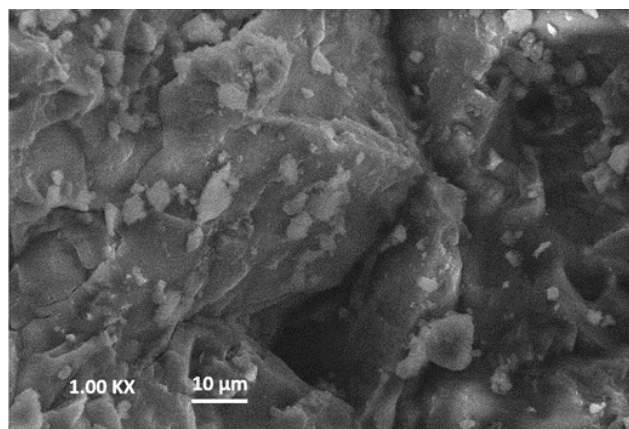
longitud de $30\mu\text{m}$ aproximadamente. Por otro lado, la muestra Tocumen (c) muestra una matriz completamente hidratada, con cristales hexagonales bien definidos y poros grandes definidos. Una matriz bien hidratada manifiesta la ganancia de resistencia a la edad de estudio. Las fisuras pueden deberse a la retracción ocurrida en la matriz y los poros a la pérdida de material por diversos medios. Sin embargo, se debe tener cuidado con las fisuras y poros pues son susceptibles a llenarse por los productos de la hidratación como el gel de sílice y desencadenar la expansión que produce la entrada de los productos de la corrosión al concreto [11]. Entonces, la estación Tocumen es más susceptible al ataque de los agentes promotores de la corrosión.



(a)



(b)



(c)

Figura 5. SEM. Grado de hidratación del cemento a un año de exposición.

La corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto obedece a un proceso electroquímico que ocurre por la difusión de los iones cloruros en el concreto a través de las fisuras. El origen de los cloruros en el concreto es diverso desde su presencia en la mezcla de concreto hasta el ambiente que rodea la edificación. Lo cierto es que, una vez la capa protectora del acero pierde su estabilidad comienza el proceso corrosivo cuyo producto expande la sección que la contiene, disminuye la sección efectiva de acero y genera la falta de adherencia al conjunto acero – concreto. Por ello, fue necesario el monitoreo de la corrosión en la investigación.

Estudios han demostrado que se puede minimizar la pérdida de la sección efectiva del acero si se diseña un concreto que se expone a condiciones marinas si es diseñado con espesores de recubrimiento igual a cuatro cm, relación agua/cemento de 0.4 y curado por 28 días. El ensayo de potencial de corrosión de media celda definió la probabilidad de ocurrencia de corrosión en el concreto reforzado en forma cualitativa, por eso se utiliza como complemento de otros ensayos. Este es normado bajo la designación ASTM C 876 cuyos criterios utilizados para medirlo son presentados en la tabla 1. Para garantizar un resultado exitoso se humedeció la superficie del hormigón y se midió la diferencia de potencial entre el acero y la superficie húmeda del hormigón que funciona como electrodo de referencia [4], [5], [6].

**Figura 6.** Ensayo de medición de potencial**Tabla 1.** Criterio de Probabilidad de Corrosión. Norma ASTM C 876 - 91

Ecor vs ECS (mV)	Probabilidad de Corrosión
> - 120	10% probable
-120 a -270	Zona de incertidumbre
< -270	90% de probabilidad

La medida de potencial de corrosión se realizó antes de someter las losas a la intemperie y a un año de exposición. Las muestras se identificaron como control, Coclé (Penonomé) y Tocumen. Los resultados se exponen en las tablas 2 y 3. De estos resultados podemos inferir que antes de la exposición a la intemperie la muestra de Tocumen y Coclé (Penonomé) presentaba una probabilidad de 10% de ocurrencia de corrosión. Mientras que la muestra Control al inicio de la investigación se encontraba en la zona de incertidumbre establecida en la tabla 1. Ninguna de las muestras presentó la probabilidad del 90% de probabilidad de ocurrencia de corrosión. Esta situación puede deberse a que al inicio de la investigación las losas no se han secado y hay un alto contenido de humedad que facilita el proceso electroquímico en la medición inicial.

Tabla 2. Medición de potencial de corrosión de las muestras antes de la exposición a la intemperie. ASTM C 876

	1	2	3	4	5	6
	-97.5	-131.0	-136.1	-76.6	-	-
	122.6	132.0				
control	7	8	9	10	11	12
	-90.5	-120.3	-131.8	-	-	-
	139.8	131.1	137.7			
Coclé	1	2	3	4	5	6
	-74.1	-107.3	-109.3	-73.0	-	-
	113.4	121.8				
	7	8	9	10	11	12

	- 121.4	-119.6	-112.2	-98.6	- 103.2	-74.7
Tocumen	1	2	3	4	5	6
	-32.3	-62.2	-63.2	-27.5	-48.5	-60.2
	7	8	9	10	11	12
	-22.6	-56.3	-62.2	-53.7	-40.8	-65.7

A un año de exposición, los valores dieron como resultado ser mayores a -120mV, lo que indica que todas las armaduras del concreto están en la región del 10% establecida en la tabla 1.

Tabla 3. Medición de potencial de corrosión de las muestras un año expuestas a la intemperie

control	1	2	3	4	5	6
	-70.3	-68.3	-64.8	-63.2	-73.1	-67.8
	7	8	9	10	11	12
	-65.3	-61.1	-54.8	-63.1	-64.4	-62.4
Coclé	1	2	3	4	5	6
	-03.6	-08.6	-02.3	-06.4	-17.3	-20.8
	7	8	9	10	11	12
	-17.2	-16.7	-18.7	-14.1	-21.4	-17.6
Tocumen	1	2	3	4	5	6
	-25.3	-20.8	-18.5	-14.8	-12.3	-12.8
	7	8	9	10	11	12
	-15.1	-11.8	-8.3	-7.0	-5.1	-6.0

De las tablas anteriores podemos observar que los valores de la losa representativa de la estación Tocumen siempre permanecieron dentro del 10% de probabilidad de ocurrir la corrosión.

Por último, los ensayos practicados son útiles para comprender el mecanismo que se da en el proceso de difusión en la hidratación del cemento en el concreto reforzado expuesto a la intemperie por un año. Sin embargo, la visita al sitio de la edificación o la extracción de núcleos son recursos que pueden indicar con certeza la situación acaecida en el lugar, además de usarlos para el ensayo de resistencia a la compresión. Si se extraen núcleos el ingeniero encargado debe escoger el lugar de la extracción con cuidado para no afectar la armadura embebida en el concreto. En la figura 7 podemos observar la distribución inadecuada del agregado como resultado de un débil mezclado a mano. Esta situación ocasiona áreas de falla por resistencia. También pueden observarse poros y agregados contaminados que debilitan la sección [12].



Figura 7. Núcleo de tres pulgadas de diámetro usado para análisis visual del perfil del concreto.

4. Conclusiones

Del presente trabajo puede concluirse:

- Los ensayos aquí presentados permitieron relacionar los resultados e indicar que el ambiente marino-industrial es el más crítico.
- El método de exposición a la intemperie de forma natural utilizado tiene la ventaja de dar las respuestas más cercanas a la realidad. Sin embargo, tiene el inconveniente de resultados a largo plazo. En lo que respecta a los métodos de ensayo podemos decir que son apropiados para mediciones no invasivas en el concreto y dan resultados en tiempo real, excepto la extracción de núcleos.
- Los resultados aquí obtenidos son aplicables a los cuidados en el diseño de concreto a utilizar según el sitio geográfico, especificaciones de diseño, relación agua/cemento y espesor de recubrimiento.
- Recomendamos se incrementen los análisis de perfiles del concreto para comprenderlo mejor. Partir del resultado obtenido en un futuro próximo se estudiará la afectación del ambiente marino-industrial existente entre muestras expuestas en el pacífico y el atlántico panameño.
- Esta investigación es parte de un programa de dos años de estudio de la durabilidad del concreto reforzado afectado por el microambiente que rodea la edificación. Esperamos infundir en estudiantes, investigadores y a la comunidad científica a plantear proyectos de investigación de nivel micro en concreto ya sea en entorno acelerado o no.

AGRADECIMIENTOS

El apoyo brindado por la Licenciada Fidedigna V. de Ortiz, el Ingeniero Ernesto Escobar, Licenciado Mario Miranda, José M. Pérez como personal técnico del Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales (LABAICA) fue clave en la culminación de este estudio. En la misma vía, la participación del Licenciado Jesús Villar del Centro Experimental de Ingeniería (CEI) de la Universidad Tecnológica de Panamá fue definitivo para llegar a feliz término la investigación. Por lo antes expuesto, damos las gracias por la colaboración brindada.

REFERENCIAS

- [1] Vélez, L. M., "Permeabilidad y Porosidad en el Concreto", *Sistema de Revistas Científicas ITM, Tecnológicas*, no.25 (2010), [Online]. Available: <https://repositorio.itm.edu.co/handle/20.500.12622/869?show=full>.
- [2] Zhang, J.Z., Buenfeld, N. R., "Chloride Profiles in Surface – Treated Mortar Specimens", *Construction and Building Materials*, vo. 14, pp. 359-364, September-October 2000, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006180000043X>.
- [3] Piqué, T., Vázquez, A., Uso de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento, *Rev. Concreto y Cemento, Investigación y Desarrollo*, Vol. 3, No.2, 2012.
- [4] Roa, G., Aperador, W., Delgado, E., "Design of a Remote Monitoring System for Evaluation of Corrosion in Reinforced Concrete Structures Under Chloride Ion Attack", *Rev. Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 16, Issue 4, pp. 565-572, October-December 2015, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1405774315000414>.
- [5] Estrada, A., López, A., Chavarría, M., Rojas, Z., "Velocidad de Corrosión en el Sistema acero – concreto: enfoque al método de curado", *CULCYT*, Año 10, no. 51, septiembre-Diciembre (2013).
- [6] Carvajal, A., Silva, C., Valiente, J., Venegas, A., "Medidas de Potencial de Corrosión en sistemas de penetración acelerada de iones cl, en hormigón armado", *Rev. De la Construcción*, vol. 3, no.1, agosto 2004.
- [7] ACI 211 (Práctica Estándar de Elección de las Proporciones para el Concreto Normal, de densidad elevada y masivo)
- [8] Manterola, C., Otzen, T., "Why Research and How to conduct a Research", *Int. J. Morphol*, vol. 31, no.4, pp. 1498-1504, Diciembre 2013.
- [9] Hincapié, A., Montoya, Y., "La microestructura de los prefabricados de concreto", *Rev. Universidad EAFIT*, vol. 41, no.140, pp. 95-105, 2005, [Online]. Available: <https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/17157/document%20-%202020-08-15T140446.782.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [10] ASTM, Designation: C856-18a, Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete.
- [11] Monteagudo, S., *Estudio microestructural y de los procesos de hidratación de cementos con adiciones*, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2014.
- [12] Hincapié, A., Valencia, J., "Resistencia al hormigón: núcleos vs cilindros", *Rev. Universidad EAFIT*, vol. 39, no. 13, pp. 87-91, 2003, [Online]. Available: [file:///C:/Users/aldac/Downloads/905-Texto%20del%20art%C3%ADculo-2758-1-10-20120613%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/aldac/Downloads/905-Texto%20del%20art%C3%ADculo-2758-1-10-20120613%20(1).pdf)

Diagnóstico de acueductos rurales abastecidos de fuentes subterráneas: caso de estudio El Calabacito, Provincia de Herrera, Panamá

Diagnosis of rural aqueducts supplied from underground sources: El Calabacito case study, Herrera Province, Panama

Yarelis Melgar ¹, Euclides Manuel Deago ^{2*}, Nathalia Tejedor-Flores ³

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

² Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH), Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

³ Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH), Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: euclides.deago@utp.ac.pa

RESUMEN— La calidad del agua está ligada a la salud y garantizarla supone el bienestar colectivo de la población; por lo tanto, los esfuerzos de las naciones deben ir orientados a suplir este derecho universal. En Panamá, la calidad del agua para el consumo y la seguridad alimentaria supone un gran desafío: el cumplimiento total del Objetivo 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible para el año 2030. Esta investigación revela la influencia de aspectos técnicos y sociales en la calidad del agua de cuatro acueductos rurales en El Calabacito; sistemas que se abastecen de pozos de agua subterránea que no reciben tratamiento oportuno. En este sentido, se efectuaron análisis de laboratorio durante 2018-2019, como parte del estudio “Diagnóstico y mejoras al sistema de acueducto rural de las comunidades de Ojo de Agua, Las Lomas, La Canoa y El Calabacito”, para conocer el estado fisicoquímico y microbiológico del agua en el área de estudio. Se encontró que la calidad fisicoquímica es aceptable para el consumo; no obstante, es necesario aplicar tratamiento para reducir las concentraciones de coliformes totales reportadas en los análisis. Considerando las características tecnológicas y socioeconómicas del área de estudio, se recomienda la desinfección del agua con cloro, para potenciar el beneficio/costo en el proceso de tratamiento previo. Es aconsejable, además, el monitoreo de parámetros como la turbiedad, alcalinidad, dureza y cloro residual de las fuentes; debido a concentraciones por encima de los valores máximos permitidos por los reglamentos técnicos DGNTI-COPANIT 23-395-99 y 21-2019.

Palabras clave— Acueductos rurales, calidad de agua subterránea, GIRH, ODS.

ABSTRACT— Water quality is linked to health and guaranteeing it supposes the collective well-being of the population; therefore, the efforts of the nations must be oriented to supply this universal right. In Panama, the quality of water for consumption and food safety is a great challenge: the total fulfillment of Goal 6 of the Sustainable Development Goals by 2030. This research reveals the influence of technical and social aspects on the quality of the water from four rural aqueducts in El Calabacito; systems that are supplied by groundwater wells that do not receive timely treatment. In this sense, laboratory analyzes were carried out during 2018-2019, as part of the study "Diagnosis and improvements to the rural aqueduct system of the communities of Ojo de Agua, Las Lomas, La Canoa and El Calabacito", to know the physicochemical status and microbiology of the water in the study area. The physicochemical quality was found to be acceptable for consumption; however, it is necessary to apply treatment to reduce the concentrations of total coliforms reported in the analyzes. Considering the technological and socioeconomic characteristics of the study area, it is recommended to disinfect the water with chlorine, to enhance the benefit / cost in the pre-treatment process. It is also advisable to monitor parameters such as turbidity, alkalinity, hardness and residual chlorine of the sources; due to concentrations above the maximum values allowed by the DGNTI-COPANIT technical regulations 23-395-99 and 21-2019.

Keywords— Rural aqueducts, groundwater quality, IWRM, SDG.

Citación: Y. Melgar, E. Deago y N. Tejedor, “Diagnóstico de acueductos rurales abastecidos de fuentes subterráneas: caso de estudio El Calabacito, Provincia de Herrera, Panamá”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 2, pp. (), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 26 de febrero de 2021. **Recibido con correcciones:** 14 de abril de 2021. **Aceptado:** 14 de mayo de 2021.

DOI.

Copyright: 2021 Y. Melgar, E. Deago y N. Tejedor. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

1. Introducción

Naciones Unidas establece que el ser humano tiene derecho a agua limpia de calidad y saneamiento [1]. Por su parte, el Objetivo 6 de la Agenda 2030 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [2], representa un compromiso de carácter mundial para garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua para consumo, y saneamiento para todos [3]; ya que tanto el bienestar social, como el desarrollo económico de las naciones no se sostienen sin un suministro de agua confiable y de buena calidad [4].

Como recurso de agua dulce, el agua subterránea juega un papel importante en la producción agrícola, el desarrollo económico y la vida misma de la población [5], aportando aproximadamente el 36% del agua utilizada en hogares a nivel mundial [6]. Las comunidades rurales no escapan de esta realidad, ya que dependen principalmente del agua subterránea que a menudo utilizan sin previo tratamiento [7]; lo que deja en evidencia que el conocimiento de la composición y variabilidad del agua subterránea, a fin de identificar los parámetros del agua que deben eliminarse o controlarse, es fundamental para garantizar la salud [8].

Áreas rurales presentan marcada negligencia en términos de infraestructura básica de agua potable e instalaciones de saneamiento, en los países en desarrollo; exponiendo a la población a una variedad de problemas relacionados con la salud y enfermedades de transmisión hídrica [4] como tifoidea, cólera, disentería, hepatitis, protozoos y otras [9]; además, enfrentan los desafíos del crecimiento de la población y la degradación de las estructuras hidráulicas existentes, a causa de la falta de mantenimiento [10]. Aunado a las malas prácticas de saneamiento, falta de educación y concienciación, ubicación geográfica de estas zonas e insuficiencia en la comunicación gubernamental; aumentando aún más estos desafíos [4]. Por esta razón, se afirma la existencia de brechas en la consistencia y la calidad del servicio de agua potable en las comunidades rurales, quienes cuentan relativamente con menos recursos económicos y tecnológicos que las áreas urbanas [11].

El monitoreo de la calidad del agua subterránea suele representar una alerta temprana si el recurso comienza a agotarse o deteriorarse, y permite evaluar si el agua es aceptable para consumo [4]. En Panamá, los principales problemas de la explotación de aguas subterráneas son la ausencia de monitoreo y que la información existente es

muy limitada y reciente [12], [13]. La entidad encargada de velar por el monitoreo de estas aguas es el Ministerio de Salud (MINSa) [14], que pese a sus esfuerzos, no cuenta con personal y recursos necesarios para el monitoreo del total de los acueductos que funcionan a nivel nacional.

El objetivo de la investigación es evaluar la calidad del agua subterránea que abastecen las comunidades de El Calabacito. Además, conocer la influencia que tienen las características técnicas y el factor humano en la calidad de las aguas de estos sistemas rurales; con la finalidad de brindar un marco de referencia para estudios futuros en esta área.

2. Métodos y materiales

2.1 Características generales

El Calabacito es un corregimiento perteneciente al distrito de Los Pozos, provincia de Herrera, en la República de Panamá (Figura 1). Presenta un clima tropical de sabana y tropical húmedo, con temperatura promedio anual entre 25°C y 34°C y precipitación promedio anual en rangos de 1,730 mm a 1,870 mm [15].

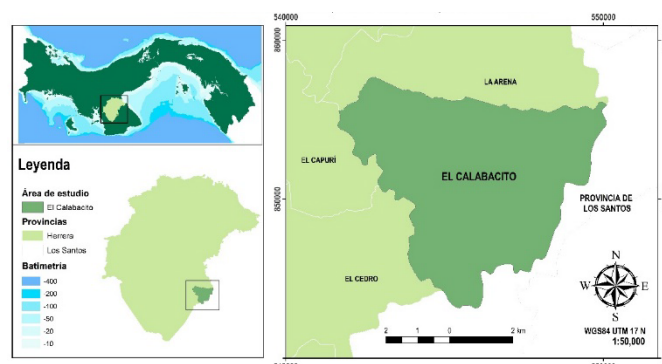


Figura 1. Ubicación geográfica de El Calabacito, Panamá. Escala 1:50,000 [15]

En esta investigación se consideran cuatro sistemas aislados de acueductos rurales, los cuales funcionan de manera similar. Cada acueducto se abastece de su respectivo pozo perforado con características específicas (tabla 1) y dirige sus aguas a un tanque de almacenamiento por sistema de bombeo. La red de distribución se alimenta directamente de este tanque de almacenamiento y distribuye agua a los hogares por gravedad.

Tabla 1. Características técnicas generales de los pozos

Características Técnicas	La Canoa	Ojo de Agua	El Calabacito	Las Lomas
Profundidad estimada (m)	37	41	30	19
Caudal estimado (l/s)	2.63	1.49	2.45	1.63
Tratamiento de aguas	No	No	No	No
Tipo de bomba	Sumergible	Sumergible	Sumergible	Sumergible
Bomba (hp)	5	5	5	1.5
Limpieza al pozo en los últimos 5 años	No	Sí	No	Sí
Estado	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno

2.1 Campañas de muestreo

Se efectuaron dos campañas de muestreo con el fin de verificar posibles cambios en las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua subterránea en diferentes épocas. La primera campaña de muestreo se llevó a cabo a finales del mes de junio de 2018, mientras que la segunda campaña de muestreo se realizó a mediados de agosto 2019 (figura 2).



Figura 2. Recolección de muestras en diferentes pozos del área de estudio.

Los muestreos se llevaron a cabo conforme al procedimiento establecido en los reglamentos técnicos DGNTI-COPANIT 21-393-99 [16], 22-394-99 [17] y el Manual de Muestro de CATHALAC [18]. Estas campañas se realizaron en colaboración con los presidentes de las Juntas Administradoras de Acueductos Rurales (JAAR) y autoridades locales. Las muestras fueron almacenadas en envases plásticos esterilizados a una temperatura aproximada de 4°C, por un periodo no mayor a 4 horas, conforme se establece en la Tabla 1 del

Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 21-393-99 [16].

2.3 Caracterización de las aguas

El procedimiento de análisis en laboratorio aplicado a las muestras de ambas campañas corresponde al Método Estándar [19]. Los parámetros fisicoquímicos y los Valores Máximos Permisibles se presentan en la Tabla 2. De esta manera, se derivan dos tipos de análisis: diagnóstico general y por comparativa de parámetros 2018-2019.

Tabla 2. Valores máximos permitidos de los criterios de evaluación de los resultados

Parámetro	Valores máximos permitidos		
	DGNTI-COPANI T 23-395-99	DGNTI-COPANI T 21-2019	Guías OMS
Turbiedad (NTU)	1	1	4
pH (potencial de H)	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8
Cloro residual (mg/L)	0.8-1.5	0.3-0.8	0.2-0.5
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1,000	850	-
Sólidos totales disueltos (mg/L)	500	500	600
Dureza (mg/L)	100	200	200
Cloruros (mg/L)	250	250	250
Sulfatos (mg/L)	250	250	250
Alcalinidad (mg/L)	120	120	120
Coliformes totales (UFC/100mL)	0	0	0
Coliformes fecales (<i>E. coli</i>) (UFC/100mL)	0	0	0

2.4 Análisis estadístico

a. Parámetros fisicoquímicos

El análisis estadístico se aplica al diagnóstico por comparativa de parámetros 2018-2019 (turbiedad, pH, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos), con la finalidad de verificar los resultados de laboratorio acerca de la calidad del agua en el área de estudio. Primeramente, se realizó un análisis descriptivo de los parámetros por medio de gráficas de barras; posteriormente, una prueba de T de Student. Para este último análisis se utilizó la herramienta “Análisis de datos” de Excel, específicamente, la función de “Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales”; donde se asumió que las variables dependientes tenían una distribución normal y se estableció un nivel de probabilidad de $p < 0.05$. De esta manera se planteó la siguiente hipótesis:

Si $p > 0.05$, se acepta H_0 , donde:

H_0 = No hay diferencias en el parámetro evaluado.

H_a = Sí hay diferencias en el parámetro evaluado

Para cada parámetro considerado se obtuvo la media de las variables, la varianza, y $P(T \leq t)$ dos colas.

b. Encuestas

Las encuestas se aplicaron a finales de 2018, a fin de conocer aspectos socioeconómicos, de composición familiar y la situación del agua según la impresión de los habitantes del área de estudio [15]. La aplicación de estas encuestas tuvo una duración de aproximadamente tres días y el cálculo de la muestra se realizó en base a 241 viviendas, que corresponden al número total estimado de viviendas que se abastecen de los acueductos en estudio. La ecuación 1 se utilizó para el cálculo de la muestra.

$$n = \frac{z^2 pq N}{e^2 (N - 1) + z^2 pq} \quad (1)$$

Donde:

N = Población

n = Tamaño de la muestra

p = proporción aproximada del fenómeno en estudio en la población de referencia

$q = (1-p)$ = proporción de la población de referencia que no presenta el fenómeno en estudio

e = Nivel de precisión

Z = Coeficiente de confiabilidad

Para un nivel de significancia de 95%, se utilizan los siguientes valores: $Z = 1.96$, $p = 0.95$, $q = 0.05$, $e = 0.05$; por lo tanto el número de muestras para las encuestas corresponde a $n = 56$ viviendas.

Durante el proceso de aplicación de encuestas, 6/56 propietarios de viviendas seleccionadas decidieron no participar o no se encontraban en el domicilio al momento de la visita; por lo tanto, el número final de encuestas aplicadas corresponde a 50.

3. Resultados y discusión

Los resultados de los análisis de calidad de agua de las cuatro fuentes subterráneas de abastecen las comunidades de Las Lomas, Ojo de Agua, La Canoa y El Calabacito para los años 2018-2019, en términos generales revelan concentraciones por debajo de los VMP para pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), cloruros y sulfatos (Tabla 3).

El pH en rangos de 6.57 a 7.92 unidades, es favorable para la formación de cloro residual libre, ya que el cloro

reacciona con el agua a un pH entre 5 y 10 unidades [9]. La CE de 302 a 454 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sugiere la presencia de baja a moderada de iones metálicos y sales disueltas [9], que pueden generar afectación en la calidad del agua, debido a la alteración del gusto [10], [20]. Los STD de 151 a 226 mg/L, son favorables, ya que niveles altos pueden provocar problemas de incrustaciones en las tuberías y cambios en el sabor del agua, así como provocar algunos problemas gastrointestinales potenciales [21], [22]. Los cloruros de 74 a 90 mg/L, sugieren una buena condición y ubicación de las fuentes de agua subterránea en el área de estudio, ya que varios autores afirman que la alta concentración de Cl^- en el agua subterránea proviene de la meteorización de minerales como la halita, y otras fuentes como efluentes domésticos, fertilizantes, fosas sépticas, sal de carreteras y fugas de vertederos [23]. El sulfato de 0 a 77 mg/L es un parámetro que se debe monitorear constantemente debido a que, las actividades agrícolas que se realizan en el área de estudio [15], pueden elevar sus concentraciones por encima de las normas, esencialmente por el uso de fertilizantes. En cuanto a sus afectaciones, el consumo de agua rica en sulfatos puede ocasionar problemas como catarsis, efecto laxante, problemas gastrointestinales y de deshidratación [21], [24].

Tabla 3. Resumen de resultados fisicoquímicos y microbiológicos para pruebas de laboratorio 2018-2019

Muestreo	Las Lomas		El Calabacito		La Canoa		Ojo De Agua	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019
Fecha	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019
Turbiedad (NTU)	-	0.9	0.9	0.43	4.4	0.77	1.3	0.61
pH (potencial de H)	7.03	7.53	6.93	7.65	6.57	7.66	7.45	7.92
Cloro Residual (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0	0
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	309	328	302	344	389	454	324	364
Sólidos Totales Disueltos (mg/L)	154	164	151	171	195	226	162	180
Dureza (mg/L)	-	89	-	100	-	140	-	104
Alcalinidad (mg/L)	-	138	-	134	-	172	-	152
Cloruros (mg/L)	-	90	-	74	-	80	-	78
Sulfatos (mg/L)	9	5	9	9	77	29	0	0
Coliformes Totales (UFC/100 mL)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Coliformes fecales (E. coli) (UFC/100 mL)	No	No	No	No	No	No	No	No

3.1 Parámetros por encima de los VMP

Las concentraciones de turbiedad de 4.4 NTU en La Canoa y 1.3 NTU en Ojo de Agua, para pruebas del 2018, exceden el límite permitido en la norma panameña de 1.0 NTU [25], [26]; no obstante, la fuente de Ojo de Agua cumple si se consideran las Guías de OMS que establece un VMP hasta 4 NTU [24]. Se considera que la turbiedad representa un indicador de contaminación en el agua [9] y sus niveles altos se deben posiblemente a la influencia de las lluvias en los recursos hídricos [27] y a las actividades de abono y la escorrentía agrícola [9] propias del área de estudio. En cuanto a afectaciones, no se ha demostrado la influencia de la turbiedad en la salud humana, sin embargo, altos niveles conllevan a la saturación del sistema de tratamiento del agua y ocasionar el ingreso de agentes patógenos al sistema de distribución [24].

El grado de dureza del agua potable es considerable en aspectos de aceptabilidad estética, como la palatabilidad, el olor, la apariencia y el color [28]. En el caso de la dureza con rango de 89 a 140mg/L, se presentaron concentraciones que estuvo por encima del VMP en el reglamento técnico DGNTI-COPANIT 23-395-99. Sin embargo, si se compara con el VMP de 200 mg/L [24], [26], se tienen rangos aceptables para el consumo. El agua dura puede causar problemas en el campo industria, como el lavado y las tuberías de circulación de agua en las calderas [9] y reducir la eficacia de los productos químicos de limpieza [7]. Estudios recientes resaltan que el exceso en el consumo de agua dura provoca problemas de salud como urolitiasis, trastornos cardiovasculares, problemas renales e incluso cáncer [29].

La alcalinidad, en rango de 134 a 172mg/L, incumple para todos los VMP. Como situación aislada, esto mejora aplicando un proceso simple de ablandamiento [15] o un proceso de filtros de carbón activado [12]. La OMS no establece riesgos a la salud por concentraciones de alcalinidad en las aguas para el consumo [24]. En tanto, los parámetros de cloro residual y coliformes totales incumplen con los VMP, que establecen que no debe existir presencia de coliformes en el agua destinada al consumo humano, ya que representan riesgos a la salud [24]–[26]. Esta situación en todas las fuentes analizadas puede relacionarse a la falta de tratamiento [15].

El cloro residual es de importancia en los sistemas de abastecimiento de agua potable porque se introduce en el agua antes de ingresar al sistema de distribución para

desinfectar cualquier bacteria que prospere en la pared de la tubería en forma de biopelícula [30]. En un estudio reciente se determinó que el cloro genera formación de subproductos derivados de la desinfección como los Trihalometanos Totales (TTHM's) en contacto con materia orgánica; incremento que se atribuye a altas concentraciones de pH, CE, cloro residual, STD y el tiempo de contacto [31]. En este sentido la OMS declara que en efecto, el uso de productos químicos para el tratamiento del agua genera subproductos; sin embargo, los riesgos a la salud resultan extremadamente pequeños si se compara con el riesgo que provoca una desinfección nula o insuficiente [24].

Por su parte, la presencia de coliformes generalmente sugiere contaminación por aguas subterráneas a través de la filtración de aguas residuales y/o materia fecal de origen animal [7], y numerosos estudios epidemiológicos en diferentes ambientes acuáticos han mostrado una relación entre el conteo de coliformes y la aparición de enfermedades infecciosas en humanos [32]. Una solución sencilla, consiste en aplicar un método simple de desinfección química como la cloración [15], debido a su costo asequible frente a la efectividad de desinfección de las aguas crudas. Sin embargo, utilizar cloro como método de desinfección supone un temor común en las poblaciones servidas, por sus posibles riesgos a la salud.

3.2. Diagnóstico por comparativa 2018-2019

Se evaluaron los resultados 2018-2019 comparando la turbiedad, pH, CE y STD del área de estudio, donde solamente la turbiedad sobrepasa el VMP de 1.0 NTU [25], [26] en las pruebas de 2018, para los acueductos de La Canoa y Ojo de Agua (figura 3). La figura 4 muestra el comportamiento del resto de los parámetros evaluados.

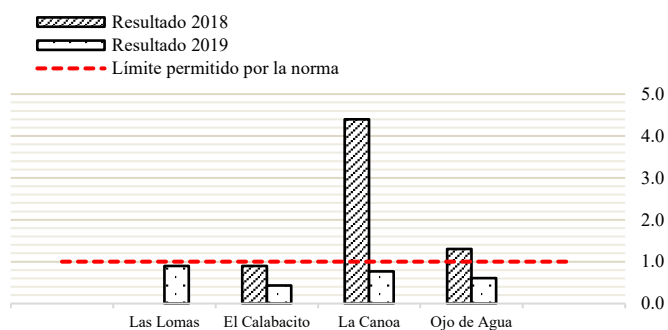


Figura 3. Turbiedad (NTU). Comparación de los resultados de turbiedad de las pruebas de 2018-2019 de los acueductos en estudio, se incluye el límite permitido por el reglamento técnico DGNTI-COPANIT 23-395-99

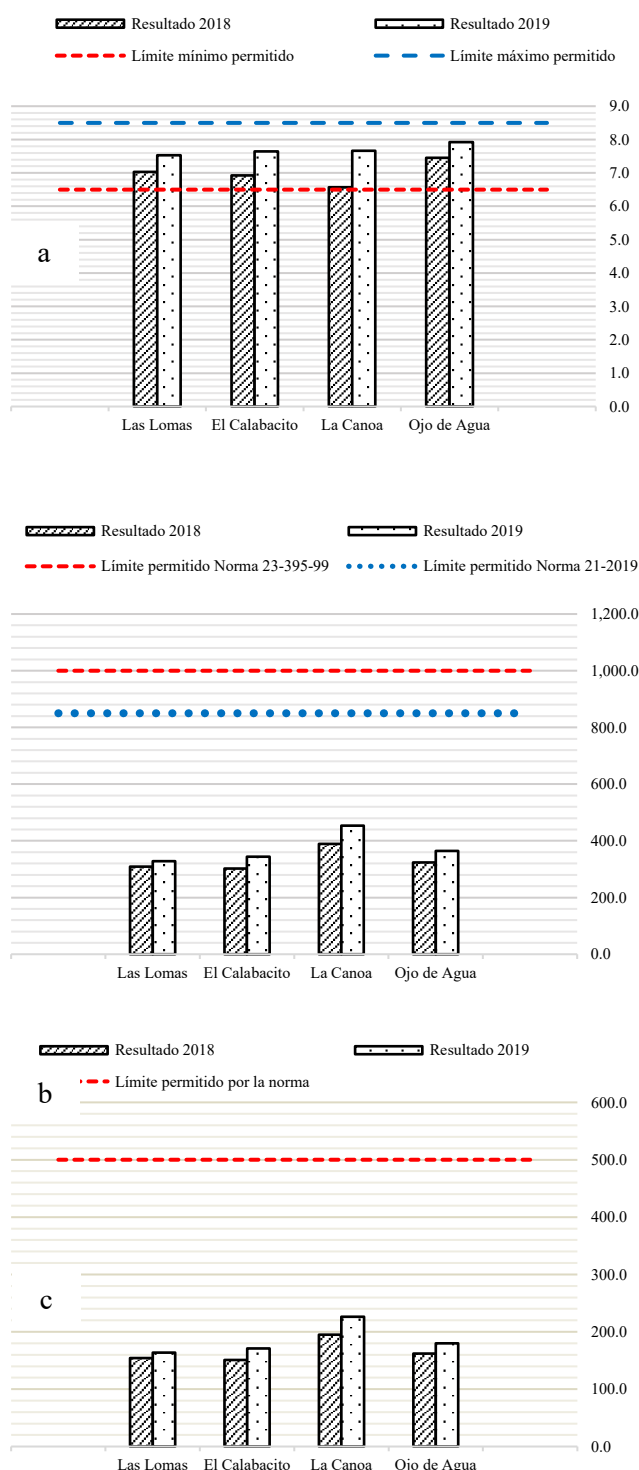


Figura 4. Comparación de los resultados de las pruebas de 2018-2019 de los acueductos en estudio, se incluye el límite permitido por el reglamento técnico DGNTI-COPANIT 23-395-99. a) pH. b) Conductividad eléctrica (µS/cm). c) Sólidos totales disueltos (mg/L).

3.3 Análisis estadístico

Considerando la cercanía de los puntos de muestreo (Figura 5) y los resultados 2018-2019 de los parámetros de turbiedad, pH, CE y STD se procedió a realizar una prueba estadística T de Student, con el fin de conocer si existía diferencia significativa en la calidad de las aguas del área de estudio según estos cuatro parámetros.

Debido a la inexistencia de estudios previos similares para el área, se partió de las muestras extraídas en las fuentes de abastecimiento durante el desarrollo de esta investigación, es decir, los resultados 2018-2019, para los cuales se aplicó una prueba T de Student para dos muestras suponiendo varianzas iguales. De esta manera se lograron obtener los siguientes resultados (tabla 4):

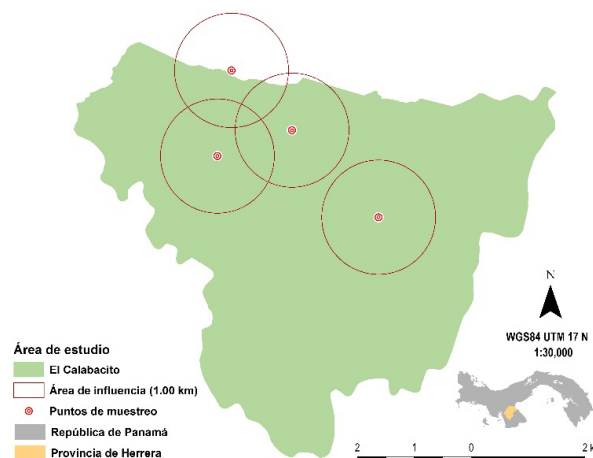


Figura 5. Cercanía de los puntos de muestreo donde las circunferencias rojas corresponden a radios de 1.00 km de distancia

Tabla 4. Resumen de resultados para los parámetros media, varianza y valor p para análisis T de Student

Parámetro	Media		Varianza		p
	Varia ble 1	Varia ble 2	Varia ble 1	Varia ble 2	
Turbiedad	2.20	0.60	3.67	0.03	0.22
pH	7.00	7.69	0.13	0.03	0.01
Conductividad	331.00	372.50	1,579.33	3,169.00	0.27
Sólidos totales disueltos	165.50	185.25	408.33	780.92	0.30

Para los parámetros de turbiedad, CE y STD se obtuvo un p-valor > 0.05 , con valores de 0.22, 0.27 y 0.30, respectivamente; por lo cual se acepta la hipótesis nula H_0 con un nivel de confianza de 95% y no se encuentran diferencias significativas para turbiedad, CE y STD en las muestras colectadas en el 2018 con respecto al 2019.

En el caso particular del pH se obtuvo un p-valor de 0.01, donde $p < 0.05$, por lo cual se rechaza la hipótesis nula H_0 con un nivel de confianza de 95% y se demuestran diferencias significativas de pH en las muestras colectadas en el 2018 con respecto al 2019.

Conforme con los resultados del análisis anterior, donde el 75 % de los parámetros no presentan variaciones significativas de un año a otro, y considerando la cercanía de los pozos, se sugiere que estos pozos se abastecen de un mismo acuífero. En futuros estudios se recomienda profundizar en este tema.

3.4 Factor humano en la calidad del agua rural

Poco se ha estudiado la influencia del factor humano en el tratamiento del agua cruda que abastece las áreas rurales. Existen comunidades rurales que consumen el agua sin tratamiento por considerarla de buena calidad; esto se debe posiblemente usuarios de acueductos rurales basan su percepción de la calidad del agua casi siempre en el sabor y la apariencia [4].

De las encuestas realizadas a 50 viviendas a finales del año 2018 se obtuvo información para conocer aspectos socioeconómicos, de composición familiar y la situación del agua según la impresión de los habitantes del área de estudio [15]. Para efectos del estudio se analizaron las respuestas de las preguntas 6 y 7 del apartado “Situación del suministro de agua potable en la vivienda” de la encuesta (ver anexo 1).

Se encontró que el 50% de los hogares encuestados tenían conocimiento de las enfermedades de origen hídrico, por la falta de tratamiento de agua para el consumo; mientras que solo 18% de los hogares encuestados respondieron haber recibido información y/o capacitación por parte de las autoridades responsables de vigilar la calidad de las aguas en Panamá, referente a las enfermedades transmitidas por el agua contaminada, (figura 6). Este último porcentaje sugiere más docencia por parte del Estado, instituciones y organizaciones pertinentes de velar por el recurso hídrico, hacia usuarios de sistemas de acueductos rurales y zonas apartadas.

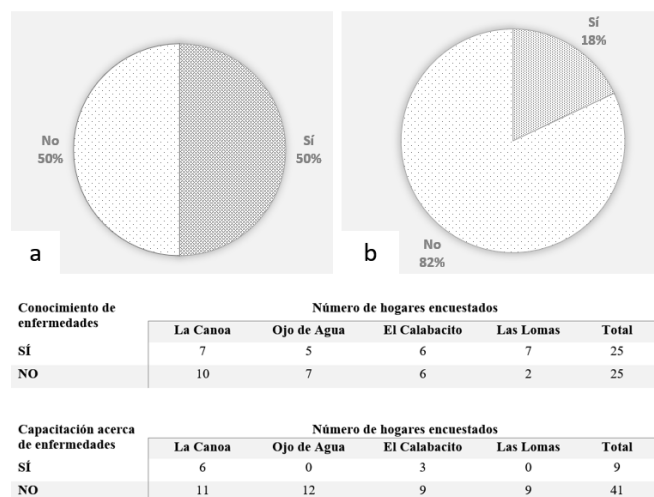


Figura 6. Resultados de encuestas referentes a la situación del agua según la impresión de los habitantes del área de estudio, como parte del proyecto “Diagnóstico y mejoras al sistema de acueducto rural de las comunidades de Ojo de Agua, Las Lomas, La Canoa y El Calabacito” [15]. a) Conocimiento de enfermedades de origen hídrico propagadas por la falta de tratamiento de agua para el consumo. b) Capacitación referente a las enfermedades de origen hídrico propagadas por la falta de tratamiento de agua para el consumo.

El cambio en el sabor del agua puede influir en la respuesta de una comunidad ante el tratamiento de agua a base de cloro; por lo tanto, las percepciones de sabor deben estudiarse junto con la implementación de un sistema de tratamiento [33]. Si bien es cierto, el cloro en forma sólida es popular debido a su disponibilidad, efectividad, costo y relativa facilidad de transporte y uso [34], se deben considerar alternativas de tratamiento del agua como el ozono o la irradiación UV, que junto al monitoreo atento del sistema de distribución pueden reducir o eliminar las preocupaciones sobre el sabor de las prácticas de desinfección a base de cloro [33]. Se requiere que el monitoreo de la calidad de aguas sea recurrente, ya que de no contar con un programa apropiado de monitoreo, la calidad podría convertirse en una limitación para el futuro desarrollo económico rural [4].

3.5 Deficiencias de diseño, operación y mantenimiento en la calidad del agua

La composición fisicoquímica y microbiológica del agua juega un rol determinante en la calidad del agua entregada; sin embargo, factores externos como deficiencias de diseño, operación y mantenimiento de los acueductos rurales, también pueden afectar la calidad.

En Panamá, el ente más básico responsable de garantizar el acceso al agua y saneamiento a usuarios de

áreas rurales son las JAAR [35]. A pesar de que las JAAR cuentan con una ley que define claramente los roles y obligaciones tanto de administradores como de los usuarios [36], presentan limitaciones, entre las cuales figuran: prácticas empíricas aplicadas al manejo de los sistemas y la insuficiencia del recurso económico para satisfacer las necesidades de operación y mantenimiento de estos sistemas, consecuencia de la mora en el pago del servicio por parte de los usuarios y las bajas tarifas impuestas [15]. Al respecto, estudios recientes en la Zona Huetar Norte (Costa Rica), sugieren que entre los factores que generan vulnerabilidad en los sistemas de acueducto rural están precisamente la falta de tratamiento básico, el mal manejo del agua por parte de los usuarios y alto nivel de deterioro por antigüedad o por falta de mantenimiento [37].

Los acueductos rurales del área de estudio no cuentan con sistemas de tratamiento, una situación que pone en riesgo la calidad del agua; comparable con un caso de estudio en la zona de rural de Turrialba (Costa Rica), donde se demostró que existe alto riesgo de contaminación debido a que el 75% de las gestoras de agua no realizan desinfección, y/o presentan tienen fallas técnicas en el proceso [38]. Aunado a esto, los miembros de la JAAR de los acueductos en estudio operan y brindan mantenimiento a sus sistemas mediante prácticas empíricas y en la mayoría de los casos, sin sustento técnico [15].

Por otra parte, estos sistemas cuentan con al menos 30 años de funcionamiento continuo desde su construcción y con mantenimiento correctivo; donde componentes como bombas, tanques de almacenamiento, tuberías, accesorios de la red de distribución, solo se renuevan en caso de daño permanente. Esta situación, junto a la falta de tratamiento, puede generar foco de contaminación de las aguas debido a infiltración de agentes patógenos en el sistema, ocasionados por daños no detectados en estos componentes deteriorados.

Para mitigar estas deficiencias, desde la perspectiva operacional de los acueductos, se sugiere a las JAAR y autoridades vigilantes de la calidad del servicio de agua rural como el Ministerio de Salud, apostar por prácticas de dosificación, las cuales deben apuntar a residuos máximos de cloro entre 1.0 y 2.0 mg/L, pero favoreciendo niveles muy por debajo de 2.0 mg/L para minimizar las preocupaciones de la comunidad en cuanto el sabor del cloro [33]. De manera consecuente, se

sugiere realizar un monitoreo de parámetros físicoquímicos y microbiológicos para determinar si existen variaciones significativas o mejoras en cuanto a la aceptabilidad del agua para el consumo, con respecto al agua sin tratamiento.

En el ámbito social, se requieren políticas psicosociales y prácticas de docencia y capacitación de usuarios en zonas apartadas, con el fin de que estos se conviertan en gestores de sus propias instalaciones de agua; considerando que la participación pública se ha aceptado e implementado ampliamente en la gestión moderna del agua [39], [40], [41]. Estas políticas proporcionan un marco exploratorio para examinar y conceptualizar el comportamiento del consumidor y lograr cambios sostenibles [41]. De esta manera se puede conseguir, por ejemplo, el pago oportuno en las tarifas por el servicio de agua, un mejor manejo del recurso y la protección del entorno a fin de disminuir las causas externas de contaminación de las fuentes de abastecimiento.

4. Conclusiones

Esta investigación permitió conocer la calidad del agua subterránea de El Calabacito, una región poco estudiada, pese a que pertenece a la cuenca del Río La Villa, una de las cuencas mejor documentadas de Panamá. Se encontró que la calidad de las aguas del área de estudio es aceptable en términos de pH, CE, STD, alcalinidad, cloruros y sulfatos. Para concentraciones por encima de los VMP: turbiedad, dureza, cloro residual y coliformes totales, se debe brindar una especial atención para garantizar mejoras en la calidad de las aguas del área de estudio.

Se requiere con prontitud un sistema auxiliar de tratamiento de aguas. Se recomienda la cloración por su relación beneficio/costo en el tratamiento; sin embargo, si se presenta un rechazo colectivo a este método, los tomadores de decisión deben evaluar alternativas como la desinfección UV, ozono, etc.

Finalmente, la falta de estudios previos similares a esta investigación para El Calabacito sugiere que en estudios futuros se monitoree, como mínimo dos veces al año, la influencia de fenómenos como la precipitación, escorrentía y/o infiltración en las concentraciones de turbiedad, dureza y coliformes totales en el agua subterránea del área de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Se reconoce el apoyo de la Dirección Regional de Los Santos y el Laboratorio de Calidad de Las Aguas (Ministerio de Salud), especialmente al Lic. Alexis de la Cruz, por su apoyo en los análisis de calidad de agua. Agradecemos a los miembros de cada JAAR por el apoyo en la obtención de las muestras y al H. R. Roberto Bultrón (2014-2019) y la Lic. Vilma Coronado por el acercamiento a la comunidad. Al trabajo voluntario de los jóvenes Jessenia Melgar, Alvis López y Luis Chávez, en la logística y desarrollo de las jornadas de muestreo.

REFERENCIAS

- [1] ONU, "Resolución 64/292. El derecho humano al agua y al saneamiento," in *Asamblea General de las Naciones Unidas*, 2010, vol. 660, pp. 9–11, [Online]. Available: http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/64/292&Lang=S.
- [2] Secretaría Técnica del Gabinete Social, "II Informe Nacional Voluntario de los ODS. Panamá: Libre de pobreza y desigualdas, la sexta frontera," Panamá, República de Panamá, 2020. [Online]. Available: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/26427Panama_Informe_Voluntario_Reducido_1_reduced.pdf.
- [3] ONU-Agua, "Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos," *ONU*, 2021. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>.
- [4] E. Lewis and T. Claasen, "Monitoring groundwater quality in a Namibian rural settlement," *Water Pract. Technol.*, vol. 13, no. 2, pp. 312–320, 2018, doi: 10.2166/wpt.2018.040.
- [5] M. Li, C. Xiao, X. Liang, Y. Cao, and S. Hu, "Hydrogeochemical evolution under a changing environment: A case study in Jilin, China," *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 20, no. 5, pp. 1653–1663, 2020, doi: 10.2166/ws.2020.072.
- [6] A. R. Vinturini, R. de C. Feroni, and E. S. Galvão, "Perception of the citizens in the city of São Mateus, Brazil, on water supply and the implications in its use," *Water Supply*, pp. 1–9, 2020, doi: 10.2166/ws.2020.357.
- [7] F. J. Saavedra, E. Yus, and F. J. Diéguez, "Microbial wash water quality on dairy farms from Galicia (NW Spain)," *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 19, no. 8, pp. 2214–2221, 2019, doi: 10.2166/ws.2019.101.
- [8] M. Antonelli, A. Azzellino, E. Ficari, A. Piazzoli, and G. Saccani, "Knowledge-based planning of groundwater treatment trains for an efficient drinking water supply system in urban areas," *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 17, no. 4, pp. 1133–1139, 2017, doi: 10.2166/ws.2017.011.
- [9] P. Bhandari, M. R. Banjara, A. Singh, S. Kandel, D. S. Rawal, and B. R. Pant, "Water quality status of groundwater and municipal water supply (tap water) from Bagmati river basin in Kathmandu valley, Nepal," *J. Water, Sanit. Hyg. Dev.*, vol. 11, no. 1, pp. 102–111, 2021, doi: 10.2166/washdev.2020.190.
- [10] H. Adamou, B. Ibrahim, S. Salack, R. Adamou, S. Sanfo, and S. Liersch, "Physico-chemical and bacteriological quality of groundwater in a rural area of Western Niger: A case study of Bonkoukou," *J. Water Health*, vol. 18, no. 1, pp. 77–90, 2020, doi: 10.2166/wh.2020.082.
- [11] C. E. Marcillo, G. G. Prado, N. Copeland, and L. H. Krometis, "Drinking water quality and consumer perceptions at the point-of-use in san rafael las flores, guatemala," *Water Pract. Technol.*, vol. 15, no. 2, pp. 374–385, 2020, doi: 10.2166/wpt.2020.025.
- [12] ANAM, *Las aguas subterráneas de la región del Arco Seco y la importancia de su conservación*. Panamá, República de Panamá, 2013.
- [13] ANAM, "Plan Nacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos de la República de Panamá 2010-2030," Panamá, República de Panamá, 2011. [Online]. Available: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/pan118989anx.pdf>.
- [14] C. de Gabinete, "Decreto Ley No. 2 de 7 de enero de 1997," Panamá, República de Panamá, 1997.
- [15] Y. Melgar and A. Vergara, "Diagnóstico y mejoras al sistema de acueducto rural de las comunidades de Ojo de Agua, Las Lomas, La Canoa y El Calabacito," Universidad Tecnológica de Panamá, 2020.
- [16] MICI, "Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 21-393-99," Panamá, República de Panamá, 1999. [Online]. Available: https://www.asep.gob.pa/wp-content/uploads/agua/legislacion/dgnti_21-393.pdf.
- [17] MICI, "Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT-22-394-99. 'Calidad del Agua,'" Panamá, República de Panamá, 1999. [Online]. Available: https://www.asep.gob.pa/wp-content/uploads/agua/legislacion/dgnti_22-394.pdf.
- [18] T. Maure, "Protocolo de muestreo, transporte y conservación de muestras de agua con fines múltiples," Panamá, República de Panamá, 2011. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/377370927/protocolo-de-muestreo-cathalac-pdf>.
- [19] American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation., "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater," 2018. <https://www.standardmethods.org/>.
- [20] CEAQ, "Détermination de la conductivité: méthode électrométrique," *Ministère du Développement durable, l'Environnement la Lutte contre les Chang. Clim.*, vol. 08, no. révision 1, pp. 1–9, 2015, [Online]. Available: <http://142.213.133.56/methodes/pdf/MA115Cond11.pdf>.
- [21] V. Wagh, S. Mukate, A. Muley, A. Kadam, D. Panaskar, and A. Varade, "Study of groundwater contamination and drinking suitability in basaltic terrain of Maharashtra, India through PIG and multivariate statistical techniques," *J. Water Supply Res. Technol.*, vol. 69, no. 4, pp. 398–414,

- Feb. 2020, doi: 10.2166/aqua.2020.108.
- [22] S. Mukate, V. Wagh, D. Panaskar, J. Jacobs, and A. Sawant, "Development of new integrated water quality index (IWQI) model to evaluate the drinking suitability of water," *Ecol. Indic.*, vol. 101, pp. 348–354, 2019, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.034>.
- [23] M. Chitsazan, N. Aghazadeh, Y. Mirzaee, Y. Golestan, and S. Mosavi, "Hydrochemical characteristics and quality assessment of urban groundwater in Urmia City, NW Iran," *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 17, no. 5, pp. 1410–1425, 2017, doi: 10.2166/ws.2017.039.
- [24] OMS, "Guías para la calidad del agua de consumo humano. Cuarta edición. Incorpora la primera adenda," Ginebra, 2018. [Online]. Available: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9/789243549958-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [25] MICI, "Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 23-395-99," Panamá, 1999. [Online]. Available: https://www.mici.gob.pa/uploads/media_ficheros/2019/07/2/normas-y-tecnologia-industrial/rt/rt-dgnti-copanit-23-395-1999.pdf.
- [26] MICI, "Resolución N° 35 de 6 de mayo de 2019," 2019. [Online]. Available: https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/28090_A/GacetaNo_28090a_20160805.pdf.
- [27] A. G. Yehia, K. M. Fahmy, M. A. S. Mehany, and G. G. Mohamed, "Impact of extreme climate events on water supply sustainability in Egypt: Case studies in Alexandria region and upper Egypt," *J. Water Clim. Chang.*, vol. 8, no. 3, pp. 484–494, 2017, doi: 10.2166/wcc.2017.111.
- [28] A. A. G. D. Amarasooriya and T. Kawakami, "Removal of fluoride, hardness and alkalinity from groundwater by electrolysis," *Groundw. Sustain. Dev.*, vol. 9, p. 100231, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.gsd.2019.100231.
- [29] R. A. Konale, N. K. Mahale, and S. T. Ingle, "Nano-zeolite-graphene oxide composite for calcium hardness removal: Isotherm and kinetic study," *Water Pract. Technol.*, vol. 15, no. 4, pp. 1011–1031, 2020, doi: 10.2166/wpt.2020.079.
- [30] D. C. Pilarski and B. D. Barkdoll, "Sensitivity of contaminant spread to decay rate in water distribution systems with implications for the spread of emerging contaminants," *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 20, no. 8, pp. 3242–3250, 2020, doi: 10.2166/ws.2020.212.
- [31] E. Nuñez, "Determinación de la presencia de Trihalometanos totales (TTHM's), en agua para consumo humano proveniente de aguas subterráneas de la ciudad de Guatemala," Universidad de San Carlos de Guatemala, 2020.
- [32] J. L. Lugo, E. R. Lugo, and M. de la Puente, "A systematic review of microorganisms as indicators of recreational water quality in natural and drinking water systems," *J. Water Health*, pp. 20–28, 2020, doi: 10.2166/wh.2020.179.
- [33] J. Stout, D. J. Tellinghuisen, D. B. Wunder, C. D. Tatko, and B. V. Rydbeck, "Variations in sensitivity to chlorine in Ecuador and US consumers: Implications for community water systems," *J. Water Health*, vol. 17, no. 3, pp. 428–441, 2019, doi: 10.2166/wh.2019.297.
- [34] M. Neff and B. D. Barkdoll, "Pipe enlargement to satisfy concentration-time product for in-system disinfection in a water distribution system," *J. Water Sanit. Hyg. Dev.*, vol. 9, no. 4, pp. 601–607, 2019, doi: 10.2166/washdev.2019.197.
- [35] M. A. Alvarez Zaldívar and N. Barranco Pilides, "Modelo de gestión de la junta administradora de acueducto rural, para desinfección de agua con tecnología sostenible en Ipetí Emberá, Panamá," *I+D Tecnológico*, vol. 15, no. 1, pp. 49–58, 2019, doi: 10.33412/idt.v15.1.2097.
- [36] MINSA, "Decreto Ejecutivo N°. 1839 de 5 de diciembre de 2014," Panamá, República de Panamá, 2014. [Online]. Available: https://www.asamblea.gob.pa/APPS/LEGISPAN/PDF_NORMAS/2010/2014/2014_614_3441.pdf.
- [37] A. Navarro-Garro, F. Araya-Rodríguez, D. Pérez-Murillo, C. Moreira-Segura, and M. Estrada-Ugalde, "Vulnerabilidad de los sistemas de acueductos rurales: cómo identificarla," *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 26, no. 3, p. 62, 2013, doi: 10.18845/tm.v26i3.1518.
- [38] L. Gaviria-Montoya, M. Pino-Gómez, and S. M. Soto-Córdoba, "Risk associated with the water infrastructure in rural water suppliers in Turrialba Cartago, Costa Rica," *Sustain. Water Resour. Manag.*, vol. 6, no. 4, pp. 1–9, 2020, doi: 10.1007/s40899-020-00410-x.
- [39] A. Lozano, M. J. Rodríguez, J. A. Mancebo, and D. Leante, "Evaluación de sistemas aislados de tratamiento de aguas residuales en Nicaragua," *Tecnol. y ciencias del agua*, vol. 10, no. 1, pp. 122–145, 2019, doi: 10.24850/j-tyca-2019-01-05.
- [40] H. Pan and M. Guo, "Can participatory water management improve residents' subjective life quality? A case study from China," *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 19, no. 5, pp. 1547–1554, 2019, doi: 10.2166/ws.2019.023.
- [41] V. Aliabadi, S. Gholamrezai, and P. Ataei, "Rural people's intention to adopt sustainable water management by rainwater harvesting practices: Application of TPB and HBM models," *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 20, no. 5, pp. 1847–1861, 2020, doi: 10.2166/ws.2020.094.

ANEXOS

Modelo de encuestas utilizado



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PANAMÁ
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL
PROYECTO DE TESIS



TEMA: DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE ACUEDUCTO RURAL DE LA POBLACIÓN DE EL CALABACITO
FORMULARIO DE ENCUESTAS - COMUNIDAD DE EL CALABACITO, LOS POZOS, HERRERA

TESISTAS: YARELIS MELGAR
ALEXIS VARGARA

ENCUESTA No. _____

HOJA DE CONTROL No. _____

LEÁSE EN VOZ ALTA: Hola, mi nombre es _____. Somos estudiantes de la Universidad Tecnológica de Panamá, estamos realizando una encuesta como parte del desarrollo de un tema de tesis que busca realizar un diagnóstico y optimización del sistema de acueducto rural para la población de su comunidad, El Calabacito. Quisiera hacerle algunas preguntas sobre su familia y actividades que realiza referentes al consumo de agua. La encuesta durará de 10 a 15 minutos y es anónima, lo que significa que su nombre y su dirección no se registrarán. Si usted participa, puede decidir no responder una pregunta o interrumpir la entrevista en cualquier momento. ¿Está de acuerdo en participar? ☐ Sí ☐ No

CARACTERÍSTICAS DE LA FAMILIA

Lease en voz alta: Quisiera empezar la entrevista haciendo algunas preguntas sobre su familia.

- ¿Cuántas familias viven en su casa?
- ¿Cuántas personas viven en su casa?
- En la familia hay niños en edad escolar (primaria/secundaria) ☐ Sí ☐ No Especificar Número:
- Hay un miembro de familia de 65 años de edad o más ☐ Sí ☐ No Especificar Número:
- Hay algún miembro de la familia con discapacidades físicas o mentales ☐ Sí ☐ No Especificar Número:
- ¿Cómo es la composición de los adultos en su casa? ☐ Hombres y mujeres ☐ Mujer sola ☐ Hombre solo
- ¿Cuál es el nivel de instrucción/educación más alta que ha completado algún miembro de la familia? ☐ Ninguno ☐ Primaria ☐ Secundaria ☐ Superior

CARACTERÍSTICAS DE LA VIVIENDA

- Su vivienda cuenta con:
☐ Suministro Eléctrico ☐ Baño dentro o afuera de la casa (incluyendo letrina) Especificar número 1 2 3
☐ Suministro de Agua potable ☐ Tanque séptico
☐ Recolección de aguas servidas
- De las siguientes declaraciones, ¿cuál describe mejor su residencia? ☐ Propia con título ☐ Propia sin título ☐ Alquilada ☐ Otros

CARACTERÍSTICAS SOCIOECONÓMICAS DE LA POBLACIÓN

- Realiza usted algún tipo de siembra en su casa: ☐ Sí ☐ No
- Si la respuesta es "Sí" ¿Cuáles?
- | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1. Granos | 2. Verduras | 3. Frutos |
| ☐ Arroz | ☐ Name | ☐ Tomate |
| ☐ Maíz | ☐ Ocio | ☐ Aji |
| ☐ Lenteja | ☐ Yuca | ☐ Naranja |
| ☐ Poroto | ☐ Otros: _____ | ☐ Papaya |
| ☐ Arveja | | ☐ Limón |
| ☐ Guandú | | ☐ Mango |
| ☐ Otros: _____ | | ☐ Marañón |
| | | ☐ Otros: _____ |

- ¿Cuántos miembros de su familia trabajan la siembra para otra persona?
- ¿Cuántos miembros de su familia trabajan la siembra para la subsistencia? O sea, para su propia alimentación.

- ¿Cria animales en su casa? ☐ Sí ☐ No
Si la respuesta es "Sí" ¿Cuáles?
☐ Pollo ☐ Res ☐ Puerco ☐ Otros: _____
- ¿Cuántos miembros de su familia trabajan la cría de animales para otra persona?
- ¿Cuántos miembros de su familia trabajan la cría de animales para la subsistencia? O sea, para su propia alimentación.

SITUACIÓN DEL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE DE LA VIVIENDA:

- Hora desde la que se cuenta con el suministro de agua: a.m. p.m.
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
- Hora en que se deja de contar con el suministro de agua: a.m. p.m.
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
- Tipo de Almacenamiento de agua para la vivienda
☐ Tanque plástico ☐ Con Tapa ☐ Sin Tapa
☐ Envase de vidrio ☐ Con Tapa ☐ Sin Tapa
☐ Otros Especificar: _____
- Tratamiento del agua almacenada
☐ Uso diario (se cambia cada día) ☐ Otro
☐ El agua se hierve Especificar: _____
☐ El agua se clora
- Considera usted que el agua tiene:
☐ Problemas de olor
☐ Mal Sabor
☐ Problemas de "limo" (algas)
☐ Otro tipo de suciedad Especificar: _____
- ¿Tiene usted conocimiento de las enfermedades que se contraen por no darle tratamiento al agua que consume? ☐ Sí ☐ No
- ¿Ha recibido usted alguna capacitación referente a las enfermedades que se contraen por no darle tratamiento al agua que consume? ☐ Sí ☐ No

LEÁSE EN VOZ ALTA: Aquí termina la entrevista. Muchas gracias por tomarse el tiempo de hablar con nosotros y contribuir con nuestra investigación. Antes de marcharnos, ¿tiene alguna pregunta sobre la encuesta que yo pueda responderle?

Uso de herramientas de optimización en el manejo de unidades de acondicionamiento de aire para la reducción del consumo eléctrico

Use of optimization tools in the management of air conditioning units to reduce electricity consumption

Edwin Collado ^{1,2}, Martín Poveda ¹, Johny González ¹, Gisselle Porcell ¹, Yessica Sáez ^{1,2,*}

¹ Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

² Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología AIP, Panamá

*Autor de correspondencia: yessica.saez@utp.ac.pa

RESUMEN— La optimización aplicada dentro de la industria permite mejorar el uso de servicios como agua, electricidad, gas y calefacción, logrando así una mejor producción y una reducción de los costos. Con esto, se logra una red autónoma, dinámica, adaptativa e interconectada, lo que facilita nuevos escenarios de uso y beneficios. Hoy en día, gran parte de las empresas cuentan con unidades de acondicionadores de aire que se utilizan para mantener una temperatura adecuada para los colaboradores y equipos, buscando que estos puedan desempeñarse exitosamente. Sin embargo, el uso descontrolado de estos dispositivos conlleva un alto consumo eléctrico, que muchas veces resulta en gran parte de los gastos mensuales de estas empresas. El objetivo de este trabajo es proponer un sistema basado en tecnologías de información y comunicación (TICs) para controlar adecuadamente el tiempo de operación de las unidades de acondicionador de aire para reducir el consumo eléctrico total en las empresas que cuenten con equipos que requieren de condiciones ambientales especiales, por ejemplo, equipos de telecomunicaciones y almacenamiento de datos. Este problema es formulado como un problema de optimización convexo, cuya solución óptima se obtiene utilizando el método de Karush-Kuhn-Tucker (KKT). Con base en esta solución óptima, se propone un algoritmo, el cual fue validado mediante el software de diseño y simulación MATLAB. Los resultados obtenidos demuestran que la técnica de optimización propuesta ayuda a mejorar el desempeño de las unidades de acondicionadores de aire, logrando un mejor consumo eléctrico, una mayor eficiencia y vida útil de los equipos, mientras se da una reducción en el costo de producción.

Palabras clave— *Acondicionadores de aire, consumo de energía, método KKT, optimización, tecnología de la información y comunicación TIC.*

ABSTRACT— The optimization applied in the industry allows to improve the use of services such as water, electricity, gas, and heating, thus achieving a better production and a reduction of costs. With this, an autonomous, dynamic, adaptive, and interconnected network is achieved, which facilitates new scenarios of use and benefits. Today, a large part of companies has air conditioning units to maintain a suitable temperature for employees and equipment, seeking a good performance. However, the uncontrolled use of these devices leads to high electricity consumption, which often results in a large portion of the monthly expenses of these companies. The objective of this work is to propose a system based on information and communication technologies (ICTs) to adequately control the operation time of air conditioning units to reduce total electricity consumption in companies that have equipment that requires special environmental conditions, for example, telecommunications and data storage equipment. This problem is formulated as a convex optimization problem, the optimal solution of which is obtained using the Karush-Kuhn-Tucker (KKT) method. Based on this optimal solution, an algorithm is proposed, which was validated using the MATLAB design and simulation software. The results show that the proposed optimization technique helps to improve the performance of the air conditioning units, by achieving better electricity consumption, greater efficiency and useful life of the equipment and a reduction in the cost of production.

Keywords— *Air conditioners, energy consumption, KKT method, optimization, information and communication technology ICT.*

Citación: Y. Saez, Uso de herramientas de optimización en el manejo de unidades de acondicionamiento de aire para la reducción del consumo eléctrico, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 18, no. 1, pp. (no modificar), 2022.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 20 de octubre de 2021. **Recibido con correcciones:** 27 de febrero de 2022. **Aceptado:** 27 de febrero de 2022.

DOI.

Copyright: 2022 Y. Saez. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

1. Introducción

Actualmente, las Tecnologías de Información y Comunicación (TICs) se han convertido en uno de los componentes principales en el sector industrial. Aproximadamente el 90% de los procesos industriales en el mundo se apoyan de una forma u otra en las TICs, alcanzando mejoras en los modelos de negocio, en los procesos y en el valor final para el cliente [1], [2]. El uso de estas tecnologías ha llevado a lo que hoy en día se conoce como la Cuarta Revolución Industrial o Industria 4.0 [3], [4].

Panamá es uno de los países en la región Latinoamericana con mayor crecimiento en TIC en los últimos años, llegando a ser considerado un Hub Digital de la región [5], [6]. Esto ha permitido la incorporación de procesos que utilizan TIC en las operaciones cotidianas de distintos sectores económicos como las empresas privadas, gubernamentales, centros educativos, hospitales, bancos, transporte, entre otros. Sin embargo, estos procesos tecnológicos requieren el uso de equipos que necesitan condiciones ambientales especiales para su correcto funcionamiento en todo momento, ya que normalmente estos equipos electrónicos son colocados en recintos cerrados, en los cuales se genera calor por defecto. Por ello, para garantizar que estos trabajen a una temperatura promedio deseada, se considera el uso permanente de acondicionadores de aire. En Panamá y en muchos otros países, en estos espacios de Tecnologías de la Información (TI) se ubican numerosas unidades de acondicionadores de aire para mantener la temperatura y humedad en niveles deseados en todo momento para garantizar el servicio de comunicaciones y evitar grandes pérdidas económicas, tanto para las entidades como para sus usuarios [7], [8].

Con base en lo anterior, es fundamental diseñar adecuadamente el sistema de manejo de acondicionadores de aire en estos espacios, no solo para garantizar las condiciones ambientales adecuadas de operación, sino también para mejorar el consumo eléctrico [9], [10]. Un inadecuado diseño de este sistema es uno de los factores principales de la interrupción en la operación en salas de cómputo, después del factor eléctrico. El diseño de estos sistemas de manejo de acondicionadores de aire no es una tarea sencilla, puesto que estos equipos tienen un alto grado de exigencia en términos de control ambiental y consumo eléctrico. Es por ello que el uso de herramientas de optimización en el

manejo de sistemas de control ambiental se ha convertido en uno de los temas más importantes en los últimos años en el campo de diseño e ingeniería. En el tema de acondicionamiento ambiental, se busca aplicar herramientas de optimización en los procesos y/o tareas del sistema para reducir el consumo eléctrico de este, mientras se garantiza una temperatura adecuada.

Existen numerosos estudios realizados en el área de la investigación relacionados con el uso de optimización en el consumo eléctrico de recintos con unidades de acondicionadores de aire. En el trabajo presentado en [11], los autores proponen un algoritmo basado en optimización para reducir el costo de energía total en sistemas de acondicionamiento de aire y el costo de incomodidad térmica de los ocupantes, siempre tomando en cuenta las características ambientales y térmicas del recinto. Estos autores, también presentan un estudio parecido en edificios de centros educativos [12], donde se estudia un problema de optimización para reducir el costo de energía relacionado con los sistemas de calentamiento, ventilación y acondicionamiento de aire de los edificios. Los autores en [13] estudian un problema de optimización de programación cuadrática secuencial (SQP) basado en tensores para optimizar la temperatura en los recintos de computación, mientras se reduce el costo del consumo eléctrico. El trabajo presentado en [14] propone un sistema de enfriamiento óptimo para minimizar el consumo de energía de las unidades de acondicionamiento de aire de las salas de computadoras en los centros de datos. En [15] se proponen un esquema de optimización multiobjetivo para ahorrar energía en un sistema de aire acondicionado de un centro de datos. Para este problema consideraron dos funciones objetivas: el consumo de energía del sistema y la estabilización de la temperatura del aire. Los autores de [16] proponen el diseño de un sistema de adecuación ambiental optimizado para reducir el consumo energético en centro comerciales. Específicamente, este trabajo busca mejorar la eficiencia de operación de las unidades para garantizar el confort de los clientes que hacen uso dentro del establecimiento y reducir el consumo de energía eléctrica.

El objetivo del trabajo presentado en este manuscrito es proponer un sistema de manejo de unidades de acondicionamiento de aire que utiliza técnicas de optimización para regular el consumo eléctrico en salas IT, garantizando en todo momento una temperatura

adecuada para el correcto funcionamiento de los equipos. Este problema está formulado como un problema convexo de programación lineal, el cual fue resuelto utilizando el método Karush-Kuhn-Tucker (KKT) [17], [18]. Los resultados muestran una reducción considerable en el consumo eléctrico, lo cual comprueba el buen funcionamiento del sistema propuesto. Además, se observa que el sistema propuesto obtiene la solución óptima del problema de manera rápida y eficaz. La mayoría de los trabajos citados sobre mejoramiento del consumo eléctrico en sistemas de adecuación ambiental buscan optimizar el diseño de estos sistemas o el nivel de variables como la temperatura o la humedad relativa en los recintos. A diferencia de estos, el sistema de manejo de unidades de acondicionamiento de aire propuesto implementa técnicas de optimización para administrar adecuadamente el tiempo de operación de las unidades de acondicionamiento de aire, manteniendo los requerimientos ambientales adecuados.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera. La Sección 2 describe el problema de optimización y su formulación matemática. La Sección 3 presenta el análisis matemático para obtener la solución óptima del problema propuesto. La Sección 4 ilustra los resultados obtenidos en nuestras simulaciones. Finalmente, la Sección 5 presenta las conclusiones del trabajo y futuras líneas de investigación.

2. Problema de optimización de manejo de acondicionadores de aire

Este trabajo de investigación propone un sistema de manejo de unidades de acondicionadores de aire en centros IT para reducir el costo del consumo eléctrico, mientras se satisfacen las condicionales ambientales deseadas para la correcta operación de los equipos. Específicamente, se busca optimizar el tiempo de trabajo de las unidades de acondicionadores de aire para lograr un consumo eléctrico mínimo y una temperatura de trabajo ideal. Se asume que estas unidades son utilizadas en espacios IT donde se exige un tiempo de operación de equipos de 24 horas. A continuación, se muestra el modelo conceptual del sistema.

2.1. Modelo conceptual del sistema

Las unidades de acondicionadores de aire cuentan con un sistema de control embebido el cual controla la temperatura y humedad relativa, por ende, en este

problema no buscamos optimizar esto, más bien, se busca optimizar el consumo eléctrico de las unidades al controlar el tiempo de operación de cada unidad. La Figura 1 muestra el sistema de manejo de unidades de acondicionamiento de aire propuesto en este trabajo. El sistema cuenta con N unidades de acondicionadores de aire, las cuales se utilizan para ajustar la temperatura dentro del recinto con los equipos IT. Cada unidad tiene un compresor y un deshumidificador que trabajan un tiempo específico durante el día. Cada una de estas componentes tiene un consumo de potencia que afecta el costo de consumo eléctrico total.

Con este sistema se busca estudiar lo siguiente: ¿Cuántos días al mes debe trabajar cada unidad de acondicionadores de aire para reducir consumo eléctrico y satisfacer las necesidades ambientales del centro IT?

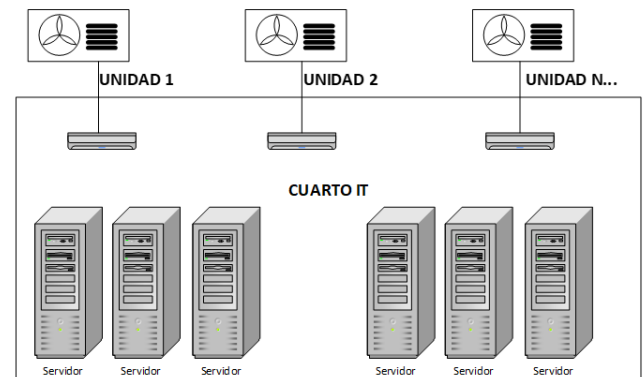


Figura 1. Modelo conceptual del sistema de manejo de acondicionadores de aire.

2.2. Formulación del problema de optimización

Para facilitar el análisis matemático, en la formulación del problema se considera un escenario con un centro de datos, utilizado para brindar servicio y soporte a empresas. Para este caso se busca minimizar el consumo eléctrico de las tres unidades de acondicionadores de aire A, B y C con las que cuenta el centro IT, las cuales se usan para adecuar el ambiente de los equipos. Como fue mencionado anteriormente, cada unidad tiene un compresor y un deshumidificador que trabajan al día 21.5 y 3.5 horas, respectivamente, para la unidad A, 22 y 2.8 horas, respectivamente, para la unidad B y 21.8 y 3 horas, respectivamente, para la unidad C. En todas las unidades, la potencia absorbida por el compresor es de 10 kW, mientras que para la resistencia del deshumidificador es de 1 kW. Las unidades trabajan una a la vez, entre 10 y 18 días al mes. La Tabla 1 resume las características de

las unidades de acondicionadores de aire, cuyos datos técnicos son de algunos equipos comerciales, lo cual fortalece el estudio.

Tabla 1. Datos de las unidades de aire

Unidades	A	B	C
Horas de uso del compresor	22	21.8	21.5
Horas de uso del deshumidificador	2.8	3	3.5
Potencia del compresor (kW)	10	10	10
Potencia del deshumidificador (kW)	1	1	1

El objetivo del sistema propuesto es minimizar el consumo energético optimizando el tiempo de operación de las unidades de acondicionamiento de aire. Sabemos que las tres unidades de acondicionadores de aire tienen un consumo eléctrico distinto, por lo tanto, el consumo eléctrico total para cada una de ellas está dado por la siguiente expresión.

$$E_x = P_{Cx} \cdot H_{Cx} + P_{Dx} \cdot H_{Dx} \quad (1)$$

De la ecuación (1), se obtiene el consumo por día de cada unidad de acondicionador de aire x , donde P_{Cx} es la potencia del compresor de la unidad x , H_{Cx} horas de uso del compresor de la unidad x , P_{Dx} potencia del deshumidificador de la unidad x y H_{Dx} horas de uso del deshumidificador de la unidad x . A continuación, se calcula el consumo energético diario en kWh de las tres unidades A, B y C.

$$\begin{aligned} E_A &= P_{CA} \cdot H_{CA} + P_{DA} \cdot H_{DA} = 222.8 \frac{\text{Kw} \cdot \text{h}}{\text{d}} \\ E_B &= P_{CB} \cdot H_{CB} + P_{DB} \cdot H_{DB} = 221.0 \frac{\text{Kw} \cdot \text{h}}{\text{d}} \\ E_C &= P_{CC} \cdot H_{CC} + P_{DC} \cdot H_{DC} = 218.5 \frac{\text{Kw} \cdot \text{h}}{\text{d}} \end{aligned}$$

La función objetivo del problema de optimización está dada por la suma de consumo eléctrico de cada unidad de acondicionador de aire.

$$f(x, y, z) = E_A \cdot x + E_B \cdot y + E_C \cdot z \quad (2)$$

donde las variables de decisión son:

x = días de trabajo de la unidad A.

y = días de trabajo de la unidad B.

z = días de trabajo de la unidad C.

Según las consideraciones técnicas y de operación del sistema, el problema de optimización está restringido de la siguiente manera.

- a) Las unidades de acondicionamiento de aire deben trabajar M días en total

$$x + y + z = M$$

- b) Las unidades A, B y C deben trabajar al menos un el tiempo mínimo de operación D_{Min} en días

$$x \geq D_{Min} \quad y \geq D_{Min} \quad z \geq D_{Min}$$

- c) Las unidades A, B y C no deben trabajar más de un tiempo máximo de operación D_{Max} en días

$$x \leq D_{Max} \quad y \leq D_{Max} \quad z \leq D_{Max}$$

Basado en la información descrita anteriormente, el problema para optimizar el tiempo de operación de las unidades de acondicionamiento de aire para reducir el consumo energético está descrito de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar } E_A \cdot x + E_B \cdot y + E_C \cdot z \\ &\{x, y, z\} \end{aligned} \quad (3)$$

sujeto a

$$\begin{aligned} x + y + z &= M \\ D_{Min} &\leq x \leq D_{Max} \\ D_{Min} &\leq y \leq D_{Max} \\ D_{Min} &\leq z \leq D_{Max} \end{aligned}$$

Se puede observar que el problema (3) es un problema convexo de programación lineal, lo cual permite utilizar métodos tradicionales para resolver problemas de optimización. En este caso, se considera resolver este problema de optimización por el método Karush-Kuhn-Tucker (KKT) [17], [18].

3. Análisis matemático del problema de optimización

Para el análisis matemático del problema se consideraron las siguientes condiciones con respecto al tiempo de operación.

$$\begin{aligned} 3 \cdot D_{Min} &< M < 3 \cdot D_{Max} \\ D_{Min} &< D_{Max} \\ E_C &< E_B < E_A \end{aligned}$$

Inicialmente, se reescribe el problema (3) en formato estándar de optimización.

Paso 1: Formato estándar de optimización

$$\text{Minimizar } E_A \cdot x + E_B \cdot y + E_C \cdot z \quad (3)$$

$\{x, y, z\}$

Sujeto a

$$x + y + z - M = 0$$

$$x - D_{Max} \leq 0$$

$$y - D_{Max} \leq 0$$

$$z - D_{Max} \leq 0$$

$$D_{Min} - x \leq 0$$

$$D_{Min} - y \leq 0$$

$$D_{Min} - z \leq 0$$

donde podemos definir las siguientes funciones:

$$f(x, y, z) = E_A \cdot x + E_B \cdot y + E_C \cdot z$$

$$h(x, y, z) = x + y + z - M$$

$$g_1(x) = x - D_{Max}$$

$$g_2(y) = y - D_{Max}$$

$$g_3(z) = z - D_{Max}$$

$$g_4(x) = D_{Min} - x$$

$$g_5(y) = D_{Min} - y$$

$$g_6(z) = D_{Min} - z$$

Luego, se procede a definir la condición estacionaria, de factibilidad, de holgura y de viabilidad del problema.

Paso 2. Condición estacionaria

$$\begin{aligned} \frac{d(f(x, y, z))}{dx} + \lambda \frac{d(h(x, y, z))}{dx} + \mu_1 \frac{d(g_1(x))}{dx} \\ + \mu_4 \frac{d(g_4(x))}{dx} = 0 \\ E_A + \lambda + \mu_1 - \mu_4 = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(f(x, y, z))}{dy} + \lambda \frac{d(h(x, y, z))}{dy} + \mu_2 \frac{d(g_2(y))}{dy} \\ + \mu_5 \frac{d(g_5(y))}{dy} = 0 \\ E_B + \lambda + \mu_2 - \mu_5 = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(f(x, y, z))}{dz} + \lambda \frac{d(h(x, y, z))}{dz} + \mu_3 \frac{d(g_3(z))}{dz} \\ + \mu_6 \frac{d(g_6(z))}{dz} = 0 \\ E_C + \lambda + \mu_3 - \mu_6 = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Paso 3. Condición de factibilidad

$$x + y + z - M = 0 \quad (7)$$

$$x - D_{Max} \leq 0 \quad (8)$$

$$y - D_{Max} \leq 0 \quad (9)$$

$$z - D_{Max} \leq 0 \quad (10)$$

$$D_{Min} - x \leq 0 \quad (11)$$

$$D_{Min} - y \leq 0 \quad (12)$$

$$D_{Min} - z \leq 0 \quad (13)$$

Paso 4. Condición de holgura

$$\mu_1(x - D_{Max}) = 0 \quad (14)$$

$$\mu_2(y - D_{Max}) = 0 \quad (15)$$

$$\mu_3(z - D_{Max}) = 0 \quad (16)$$

$$\mu_4(D_{Min} - x) = 0 \quad (17)$$

$$\mu_5(D_{Min} - y) = 0 \quad (18)$$

$$\mu_6(D_{Min} - z) = 0 \quad (19)$$

Paso 5. Condición de viabilidad

$$\mu_i \geq 0 \quad \text{para } i = 1:6 \quad (20)$$

Por último, se analizan todos los posibles casos que resultan de las condiciones creadas.

Paso 6. Análisis de los distintos casos

Para este problema se cuenta con 64 casos distintos. La Tabla 2 muestra los 64 casos de estudio y su respectiva validez en el problema, ya que algunos no son válidos debido a que estos no satisfacen las restricciones y condiciones del problema.

Analizando las ecuaciones (14) y (17), se puede observar que μ_1 y μ_4 no pueden ser mayor a cero, puesto que esto supondría que $x = D_{Max} = D_{Min}$, incumpliendo la condición $D_{Max} > D_{Min}$. De esta misma manera, se pueden descartar todos los casos que cumplan con μ_2 y $\mu_5 > 0$ y μ_3 y $\mu_6 > 0$.

Al igualar las ecuaciones (4) y (5), se obtiene la siguiente expresión.

$$E_A - E_B + \mu_1 + \mu_5 - \mu_2 - \mu_4 = 0$$

Ahora, sabiendo que $E_A > E_B$, se puede asumir que la resta de ambas energías es una constante positiva la cual llamaremos k_1 y reescribir la ecuación con esta constante y su polaridad.

$$k_1 + \mu_1 + \mu_5 - \mu_2 - \mu_4 = 0$$

De esta manera, se sabe que para que se cumpla con las condiciones de viabilidad $\mu_2 > 0$ o $\mu_4 > 0$. De lo contrario, se obtiene la ecuación $k_1 + \mu_1 + \mu_5 = 0$ que no cumple la condición de viabilidad.

De esta misma manera, podemos analizar las ecuaciones (4), (6), y (5), (6), obteniendo que los casos

en donde $\mu_3 = 0$ y $\mu_5 = 0$ y $\mu_3 = 0$ y $\mu_4 = 0$ no son válidos.

$$k_2 + \mu_2 + \mu_6 - \mu_3 - \mu_5 = 0$$

$$-k_3 + \mu_3 + \mu_4 - \mu_1 - \mu_6 = 0$$

Por último, los casos en donde $\mu_1 > 0$, $\mu_2 > 0$ y $\mu_3 > 0$ no son válidos, ya que en las ecuaciones 7, 14, 15 y 16 se obtiene los valores de x , y y z igual a D_{Max} , lo que incumple la condición $3 \cdot D_{Max} > M$. De igual manera, se puede deducir que los casos en donde $\mu_4 > 0$, $\mu_5 > 0$ y $\mu_6 > 0$ no son válidos, puesto que pasaría lo mismo solo que con D_{Min} .

De esta manera, solo nos quedan 5 posibles casos, como se observa en la Tabla 3. En esta tabla, 0 indica que la variable $\mu_i = 0$ y $>$ indica que $\mu_i > 0$.

Tabla 2. Casos de estudio del problema

Caso	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6	Válido
1	0	0	0	0	0	0	No
2	0	0	0	0	0	>	No
3	0	0	0	0	>	0	No
4	0	0	0	0	>	>	No
5	0	0	0	>	0	0	No
6	0	0	0	>	0	>	No
7	0	0	0	>	>	0	Si
8	0	0	0	>	>	>	No
9	0	0	>	0	0	0	No
10	0	0	>	0	0	>	No
11	0	0	>	0	>	0	No
12	0	0	>	0	>	>	No
13	0	0	>	>	0	0	Si
14	0	0	>	>	0	>	No
15	0	0	>	>	>	0	Si
16	0	0	>	>	>	>	No
17	0	>	0	0	0	0	No
18	0	>	0	0	0	>	No
19	0	>	0	0	>	0	No
20	0	>	0	0	>	>	No
21	0	>	0	>	0	0	No
22	0	>	0	>	0	>	No
23	0	>	0	>	>	0	No
24	0	>	0	>	>	>	No
25	0	>	>	0	0	0	Si
26	0	>	>	0	0	>	No
27	0	>	>	0	>	0	No
28	0	>	>	0	>	>	No
29	0	>	>	>	0	0	Si
30	0	>	>	>	0	>	No
31	0	>	>	>	>	0	No
32	0	>	>	>	>	>	No
33	>	0	0	0	0	0	No
34	>	0	0	0	0	>	No

35	>	0	0	0	>	0	No
36	>	0	0	0	>	>	No
37	>	0	0	>	0	0	No
38	>	0	0	>	0	>	No
39	>	0	0	>	>	0	No
40	>	0	0	>	>	>	No
41	>	0	>	0	0	0	No
42	>	0	>	0	0	>	No
43	>	0	>	0	>	0	No
44	>	0	>	0	>	>	No
45	>	0	>	>	0	0	No
46	>	0	>	>	0	>	No
47	>	0	>	>	>	0	No
48	>	0	>	>	>	>	No
49	>	>	0	0	0	0	No
50	>	>	0	0	0	>	No
51	>	>	0	0	>	0	No
52	>	>	0	0	>	>	No
53	>	>	0	>	0	0	No
54	>	>	0	>	0	>	No
55	>	>	0	>	>	0	No
56	>	>	0	>	>	>	No
57	>	>	>	0	0	0	No
58	>	>	>	0	0	>	No
59	>	>	>	0	>	0	No
60	>	>	>	0	>	>	No
61	>	>	>	>	0	0	No
62	>	>	>	>	0	>	No
63	>	>	>	>	>	0	No
64	>	>	>	>	>	>	No

Ahora, se procede a analizar los 5 posibles casos para obtener la solución óptima de nuestro problema.

Caso 7: $\mu_1 = \mu_2 = 0$, $\mu_3 = 0$, $\mu_4 > 0$, $\mu_5 > 0$, $\mu_6 = 0$

De la ecuación (6), se obtiene que $\lambda = -E_C$. Reemplazando en la ecuación (4), se obtiene que $\mu_4 = E_A - E_C$. Sabiendo que $E_A > E_C$, se puede decir que el valor de μ_4 cumple con la condición de viabilidad. De igual manera, reemplazando λ en la ecuación (5), se obtiene que $\mu_5 = E_B - E_C$. Sabiendo que $E_B > E_C$, se puede decir que el valor de μ_5 también cumple con la condición de viabilidad.

De las ecuaciones (7), (17) y (18), se obtienen las siguientes expresiones:

$$x^* = y^* = D_{Min}$$

$$z^* = M - x^* - y^*$$

$$z^* = M - 2 \cdot D_{Min}$$

$$f(x^*, y^*, z^*) = E_A \cdot D_{Min} + E_B \cdot D_{Min} + E_C \cdot (M - 2 \cdot D_{Min})$$

Para analizar los intervalos en donde el caso es válido, se verifican las ecuaciones (10) y (19).

$$\begin{aligned} z^* &< D_{Max} \\ M - 2 \cdot D_{Min} &< D_{Max} \\ M &< D_{Max} + 2 \cdot D_{Min} \\ D_{Min} &< z^* \\ D_{Min} &< M - 2 \cdot D_{Min} \\ 3 \cdot D_{Min} &< M \end{aligned}$$

Se obtiene el siguiente intervalo donde la solución es válida.

$$3 \cdot D_{Min} < M < D_{Max} + 2 \cdot D_{Min}$$

Caso 13: $\mu_1 = \mu_2 = 0, \mu_3 > 0, \mu_4 > 0, \mu_5 = 0, \mu_6 = 0$

De la ecuación (5), se obtiene que $\lambda = -E_B$. Reemplazando en la ecuación (4), se obtiene que $\mu_4 = E_A - E_B$. Sabiendo que $E_A > E_B$, se puede decir que el valor de μ_4 cumple con la condición de viabilidad. De igual manera, reemplazando λ en la ecuación (6), se obtiene que $\mu_3 = E_B - E_C$. Sabiendo que $E_B > E_C$, se puede decir que el valor de μ_3 también cumple con la condición de viabilidad.

De las ecuaciones (7), (16) y (17), se obtienen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} x^* &= D_{Min} \\ z^* &= D_{Max} \\ y^* &= M - x^* - z^* \\ y^* &= M - D_{Min} - D_{Max} \end{aligned}$$

$$f(x^*, y^*, z^*) = E_A \cdot D_{Min} + E_B \cdot (M - D_{Min} - D_{Max}) + E_C \cdot D_{Max}$$

Para analizar los intervalos en donde el caso es válido, se consideran las ecuaciones (9) y (12).

$$\begin{aligned} y^* &< D_{Max} \\ M - D_{Min} - D_{Max} &< D_{Max} \\ M &< 2 \cdot D_{Max} + D_{Min} \\ D_{Min} &< y^* \\ D_{Min} &< M - D_{Min} - D_{Max} \\ D_{Max} + 2 \cdot D_{Min} &< M \end{aligned}$$

Se obtiene el siguiente intervalo donde la solución es válida

$$D_{Max} + 2 \cdot D_{Min} < M < 2 \cdot D_{Max} + D_{Min}$$

Caso 15: $\mu_1 = \mu_2 = 0, \mu_3 > 0, \mu_4 > 0, \mu_5 > 0, \mu_6 = 0$

De las ecuaciones (7), (16), (17) y (18), se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} x^* &= D_{Min} \\ y^* &= D_{Min} \\ z^* &= D_{Max} \\ M &= x^* + y^* + z^* \\ M &= D_{Max} + 2 \cdot D_{Min} \end{aligned}$$

$$f(x^*, y^*, z^*) = E_A \cdot D_{Min} + E_B \cdot D_{Min} + E_C \cdot D_{Max}$$

Se obtiene el siguiente intervalo donde la solución es válida.

$$M = D_{Max} + 2 \cdot D_{Min}$$

Caso 25: $\mu_1 = 0, \mu_2 > 0, \mu_3 > 0, \mu_4 = \mu_5 = \mu_6 = 0$

De la ecuación (4), se obtiene que $\lambda = -E_A$. Reemplazando en la ecuación (5), se obtiene que $\mu_2 = E_A - E_B$. Sabiendo que $E_A > E_B$, se puede decir que el valor de μ_2 cumple con la condición de viabilidad. De igual manera, reemplazando λ en la ecuación (6), se obtiene que $\mu_3 = E_A - E_C$. Sabiendo que $E_A > E_C$, se puede decir que el valor de μ_3 también cumple con la condición de viabilidad.

De las ecuaciones (7), (15) y (16), se obtienen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} y^* &= D_{Max} \\ z^* &= D_{Max} \\ x^* &= M - y^* - z^* \\ x^* &= M - 2 \cdot D_{Max} \end{aligned}$$

$$f(x^*, y^*, z^*) = E_A \cdot (M - 2 \cdot D_{Max}) + E_B \cdot D_{Max} + E_C \cdot D_{Max}$$

Para analizar los intervalos en donde el caso es válido, se verifican las ecuaciones (8) y (11).

$$\begin{aligned} x^* &< D_{Max} \\ M - 2 \cdot D_{Max} &< D_{Max} \\ M &< 3 \cdot D_{Max} \\ D_{Min} &< x^* \\ D_{Min} &< M - 2 \cdot D_{Max} \\ 2 \cdot D_{Max} + D_{Min} &< M \end{aligned}$$

Se obtiene el siguiente intervalo donde la solución es válida.

$$2 \cdot D_{Max} + D_{Min} < M < 3 \cdot D_{Max}$$

Caso 29: $\mu_1 = 0, \mu_2 > 0, \mu_3 > 0, \mu_4 > 0, \mu_5 = \mu_6 = 0$

De las ecuaciones (7), (15), (16) y (17), se obtienen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}x^* &= D_{Min} \\y^* &= D_{Max} \\z^* &= D_{Max} \\M &= x^* + y^* + z^* \\M &= 2 \cdot D_{Max} + D_{Min}\end{aligned}$$

$$f(x^*, y^*, z^*) = E_A \cdot D_{Min} + E_B \cdot D_{Max} + E_C \cdot D_{Max}$$

Se obtiene el siguiente intervalo donde la solución es válida.

$$M = 2 \cdot D_{Max} + D_{Min}$$

A continuación, se resume la solución óptima del problema para las distintas condiciones presentadas en los casos estudiados.

a) Si $3 \cdot D_{Min} < M < D_{Max} + 2 \cdot D_{Min}$, entonces

$$\begin{aligned}x^* &= y^* = D_{Min} \\z^* &= M - 2 \cdot D_{Min}\end{aligned}$$

b) Si $M = D_{Max} + 2 \cdot D_{Min}$, entonces

$$\begin{aligned}x^* &= y^* = D_{Min} \\z^* &= D_{Max}\end{aligned}$$

c) Si $M = 2 \cdot D_{Max} + D_{Min}$, entonces

$$\begin{aligned}x^* &= D_{Min} \\y^* &= z^* = D_{Max}\end{aligned}$$

d) Si $D_{Max} + 2 \cdot D_{Min} < M < 2 \cdot D_{Max} + D_{Min}$, entonces

$$\begin{aligned}x^* &= D_{Min} \\z^* &= D_{Max} \\y^* &= M - D_{Min} - D_{Max}\end{aligned}$$

e) Si $2 \cdot D_{Max} + D_{Min} < M < 3 \cdot D_{Max}$, entonces

$$\begin{aligned}x^* &= M - 2 \cdot D_{Max} \\y^* &= D_{Max} \\z^* &= D_{Max}\end{aligned}$$

Con base en el análisis matemático, se propone un algoritmo para el problema de optimización del consumo eléctrico en sistemas de acondicionadores de aire que considera todos los posibles escenarios, el cual se describe en la Figura 2.

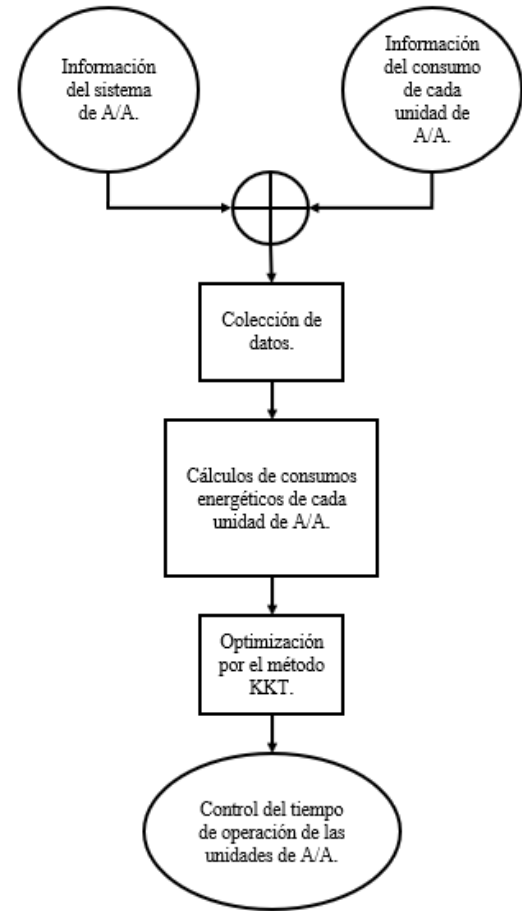


Figura 2. Diagrama de flujo propuesto para la optimización del consumo eléctrico.

El problema para optimización propuesto puede extenderse para controlar el tiempo de operación N de unidades de acondicionamiento de aire, como se muestra a continuación.

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^N E_i x_i$$

$$\{x_i\}$$

sujeito a

$$\sum_{i=1}^N x_i = M$$

$$D_{Min} \leq x_i \leq D_{Max} \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}$$

donde x_i representa el tiempo de operación de la unidad i . Este problema general requiere un análisis matemático más complejo, por lo que será considerado para futuros trabajos.

4. Simulación y resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en el software de simulación MATLAB y el software de modelado de problemas de optimización CVX [19], [20]. Las pruebas fueron llevadas a cabo en un computador DELL con procesador i7-9700 CPU de 3.00GHz, memoria RAM de 16 GB y un disco duro de 1 TB.

Para las simulaciones de este trabajo se utilizaron los datos técnicos y de consumo mencionados en la sección de formulación y los resultados del análisis matemático del problema. En la Tabla 3, se describe los 7 escenarios aplicados en la simulación del código de Matlab para los diferentes valores de días de D_{Min} y D_{Max} . Los escenarios 1 y 7 corresponden a que las unidades de aire operan equitativamente la misma cantidad de días, es decir $\frac{1}{3}$ de M , ya que $M = 3 * D_{Min}$ o $M = 3 * D_{Max}$. Estos escenarios fueron seleccionados de tal manera que las simulaciones contemplaran todos los casos válidos en el análisis matemático.

Tabla 3. Escenarios aplicados en el código de Matlab

Escenarios	D_{Min} (días)	D_{Max} (días)	M (días)
1	5	10	30
2	1	20	30
3	6	18	30
4	7	11	30
5	9	20	30
6	6	12	30
7	10	15	30

En la Figura 3, se representa el consumo mensual para distintos escenarios de D_{Max} y D_{Min} , donde la barra azul representa el consumo energético en sistemas de acondicionadores de aire tradicionales y la barra roja representa el consumo energético en sistemas de acondicionadores de aire propuesto con optimización. Se puede observar en el resultado obtenido que el sistema optimizado propuesto en este trabajo garantiza en todo momento que el consumo eléctrico es menor o igual al obtenido en el sistema tradicional, lo cual demuestra la eficiencia del algoritmo propuesto. Además, se puede observar que este trabaja mejor en los escenarios que representan los 5 casos analizados matemáticamente, lo cual permite al operador del sistema seleccionar uno de ellos para alcanzar cierto consumo deseado. Por ejemplo, el segundo escenario proporciona el consumo energético más bajo de todos al utilizar por más tiempo la unidad de

menor consumo energético.

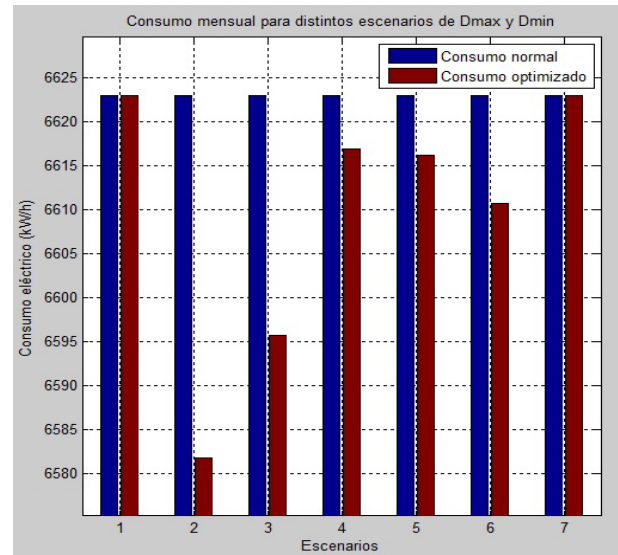


Figura 3. Consumo mensual para distintos escenarios de D_{max} y D_{min} .

En la Figura 4, se muestra la cantidad de días de uso de cada unidad para los distintos escenarios. Se puede observar que en el escenario 2, la unidad C trabaja más días con respecto a los demás escenarios, mientras que la unidad A hace lo contrario. Esto se debe en parte por los parámetros del escenario considerado en Tabla 3.

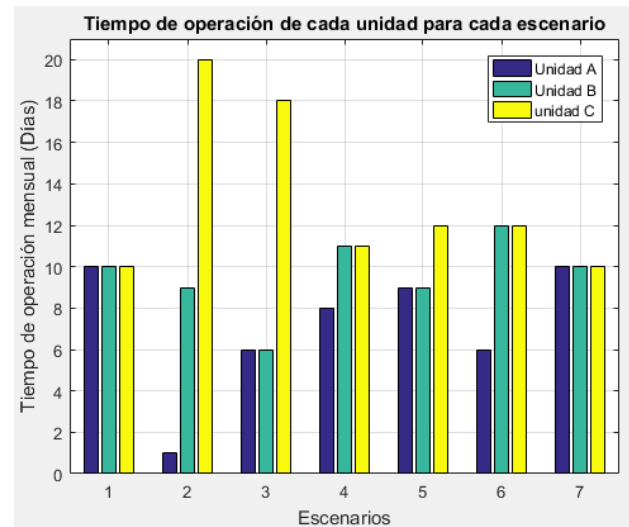


Figura 4. Tiempo de operación de cada unidad para los 7 escenarios.

En la Figura 5, se muestra el ahorro energético alcanzado en los distintos escenarios estudiados. Se puede observar que el segundo escenario proporciona un mayor ahorro energético, lo cual se traduce en un menor consumo de electricidad. También, se puede ver que los

demás escenarios en todo momento garantizan un ahorro energético positivo, tal como se esperaba en la formulación matemática.

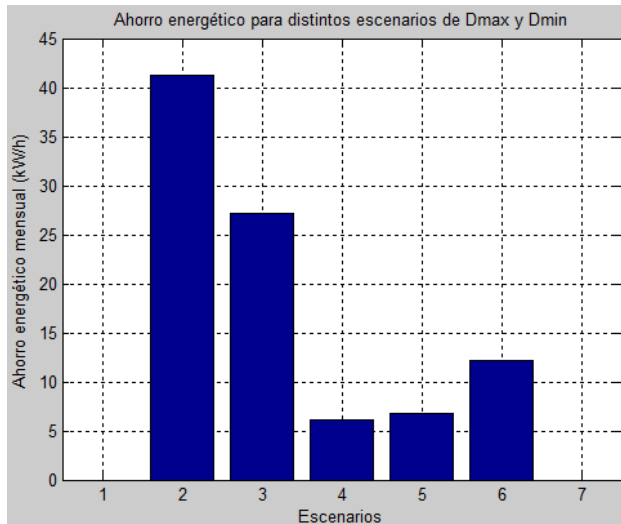


Figura 5. Ahorro energético para distintos escenarios de Dmax y Dmin.

En la Figura 6, se muestra el tiempo de computación requerido por el sistema para obtener la solución óptima en cada escenario. Podemos observar que en promedio el tiempo de computación es de aproximadamente 0.35 milisegundos, lo cual es un resultado bastante prometedor si consideramos el beneficio obtenido en la reducción del consumo eléctrico.

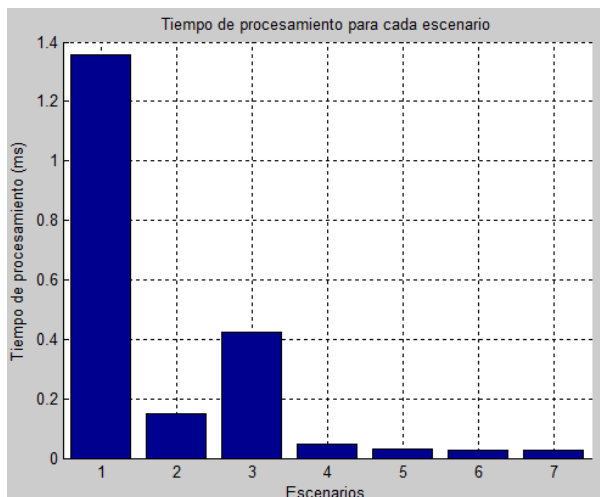


Figura 6. Tiempo de procesamiento para cada escenario.

5. Conclusiones

La optimización aplicada al campo de la ingeniería es un tema que cada día está tomando más importancia tanto

en la parte de diseño como en la de control de procesos. Con esto, se busca principalmente optimizar un sistema o proceso para obtener mayores beneficios, mientras se reducen costos.

En este trabajo se propone utilizar técnicas de optimización para administrar mejor las unidades de acondicionamiento de aire en espacios IT, con el objetivo de garantizar un ambiente adecuado para los equipos y reducir el consumo energético del mismo. Específicamente, se formula un problema de optimización convexo lineal que busca minimizar el consumo energético total del sistema de acondicionamiento ambiental. Este problema cuenta con restricciones de operación que limitan el tiempo mínimo y máximo de uso para cada unidad de acondicionador de aire. Al ser un problema de optimización convexo, es posible utilizar métodos tradicionales para resolver problemas de optimización. En este trabajo, se realizó el análisis matemático utilizando el método Karush-Kuhn-Tucker (KKT), donde se obtuvieron soluciones óptimas para distintos escenarios. Con base en estas soluciones, se propuso un algoritmo para el problema de optimización del consumo eléctrico en sistemas de acondicionadores de aires que considera todos los posibles escenarios, el cual cumple las expectativas del sistema optimizado. Este algoritmo está compuesto por instrucciones de programación sencillas, lo cual permite poder implementarlo en cualquier dispositivo que con cierto grado de computación.

Los resultados de las simulaciones demostraron que el problema de optimización propuesto en todo momento garantiza un consumo eléctrico menor o igual al obtenido en el sistema tradicional, lo cual cumple con el objetivo de este trabajo. Además, se puede observar que este controla adecuadamente el tiempo de operación de las unidades de acondicionamiento de aire consideradas, mientras se cumplen las restricciones de operación. Por último, es importante resaltar también que el algoritmo propuesto cuenta con la capacidad de obtener la solución óptima del problema de manera muy rápida y eficiente, sin importar el escenario que se este estudiando.

Como trabajo futuro, se puede considerar incluir más variables y restricciones al problema de optimización para considerar otros aspectos que sin duda pueden fortalecer el trabajo propuesto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los estudiantes e investigadores del grupo de investigación en Ingeniería de Telecomunicación y Sistemas Inteligentes Aplicados a la Sociedad (ITSIAS). Los autores E.C y Y.S. reconocen el apoyo del Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá al proporcionar financiamiento parcial para la publicación de este manuscrito.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

A continuación, se especifica la contribución de cada autor: Investigación, M.P., J.G., G.P., E.C.; Experimentación, M.P., J.G., G.P.; Conceptualización, M.P., J.G., G.P., E.C.; Preparación y corrección del artículo, M.P., J.G., G.P., E.C., Y.S.; Supervisión, E.C., Y.S..

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] Lu, Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of industrial information integration*, 6, 1-10.], [Xu, Li Da, Eric L. Xu, and Ling Li. "Industry 4.0: state of the art and future trends." *International Journal of Production Research* 56.8 (2018): 2941-2962. 2017.
- [2] Monge-González, C., Alfaro, C., & Alfaro, J. Tecnologías de la información y la comunicación (TICs), productividad y competitividad. *Revista Digital Futuros*, http://www.revistafuturos.info/autores/aut_2006/r_monge_glez.htm. 2006.
- [3] K. Schwab, "The fourth industrial revolution". Currency. 2017.
- [4] Xu, M., David, J. M., and Kim, S. H. The fourth industrial revolution: Opportunities and challenges. *International journal of financial research*, 9(2), 90-95. 2018.
- [5] Asep – Panamá. Indicadores de internet. [Online]. Available: https://www.asep.gob.pa/wp-content/uploads/telecomunicaciones/estadisticas/2020/211_2020.pdf. 2020.
- [6] González, R. M., Alfaro-Azofeifa, C., & Alfaro-Chamberlain, J. TICs en las PYMES de Centroamérica: impacto de la adopción de las tecnologías de la información y la comunicación en el desempeño de las empresas. *Idrc*. 2005.
- [7] Arregoces, M., & Portolani, M. *Data center fundamentals*. Cisco Press. 2003.
- [8] Schmidt, R. R., Cruz, E. E., & Iyengar, M. Challenges of data center thermal management. *IBM Journal of Research and Development*, 49 (4.5), 709-723. 2005
- [9] Shehabi, Arman, et al. "Data center design and location: Consequences for electricity use and greenhouse-gas emissions." *Building and Environment* 46.5. pp. 990-998. 2011.
- [10] Samadiani, E., Joshi, Y., & Mistree, F. The thermal design of a next generation data center: a conceptual exposition. *Journal of Electronic Packaging*, 130 (4). 2008.
- [11] Yu, L., Xie, D., Huang, C., Jiang, T., & Zou, Y. Energy optimization of HVAC systems in commercial buildings considering indoor air quality management. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10 (5), 5103-5113. 2018.
- [12] Xie, D., Yu, L., Jiang, T., & Zou, Y. Distributed energy optimization for HVAC systems in university campus buildings. *IEEE Access*, 6, 59141-59151. 2018.
- [13] Q. Wang, Y. Yu, B. Li and Y. Zhu, "Tensor-Based Optimal Temperature Control of CRACs in Multi-Datacenters," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 41445-41453, 2019.
- [14] Nakamura, M., Nakamura, R., Nishida, R., Takeuchi, A., & Tominaga, T. Energy efficient cooling in data center using optimization approach. In *2012 Proceedings of SICE Annual Conference (SICE)* (pp. 2103-2108). IEEE. 2012.
- [15] Yao, L., & Huang, J. H. Multi-objective optimization of energy saving control for air conditioning system in data center. *Energies*, 12 (8), 1474. 2019.
- [16] R. Requejo, E. Eli. Optimización del sistema de aire acondicionado para el ahorro energético en el centro comercial Plaza vea Chiclayo. 2019
- [17] S. Boyd and L. Vandenberghe, "Convex optimization," Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK: Cambridge University Press, Mar. 2004.
- [18] Caballero J. A., I. E. Grossmann. "Una revisión del estado del arte en optimización", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* 4. pp. 5-23. 2007.
- [19] Moore, H., & Sanadhyia, S. *MATLAB for Engineers* (Vol. 4). Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. 2007.
- [20] M. Grant and S. Boyd. CVX: MATLAB software for disciplined convex programming (web page and software), 2008. Available from: <http://www.stanford.edu/boyd/cvx/>. 2008.

Gestión de riesgos de desastres municipal basado en las TIC: Caso de estudio Panamá

ITC-based Municipal Disaster Risk Management: Panama Case Study

Elvira Meléndez¹, José Iván Isaza-González², JM Castillo³, Ricardo González¹, Ignacio Chang⁵, Antony García⁶

^{1,4} Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

^{2,3} Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación en Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

^{5,6} Facultad de ingeniería eléctrica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: jose.isaza@utp.ac.pa

RESUMEN. La expansión y el creciente dominio de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) y la pandemia de COVID -19 han establecido un clima de cambio y reinención de las estructuras tradicionales de los gobiernos, dando paso a una nueva generación de servicios públicos modernizados o gobiernos electrónicos. Este caso de estudio presenta un sistema de Gestión Integral de Riesgos de Desastres (GIRD) y la metodología para la realización de los planes de acción por cada riesgo potencial. La principal contribución radica en un modelo relacional basado en una plataforma informática que capta la evolución de cada riesgo de acuerdo con los niveles de probabilidad y severidad. Este modelo tiene un enfoque global e integrado que se centra en las condiciones subyacentes de las catástrofes (peligro y vulnerabilidad) y hace énfasis en la coordinación multinivel, multidimensional, y multidisciplinar entre las partes involucradas, utilizando la herramienta de panel de datos para visualización en la toma de decisiones y la inclusión ciudadana en las mismas.

Palabras clave. Gestión de riesgo, gobierno digital, peligro, severidad, probabilidad, Sistema de Gestión de la Seguridad.

ABSTRACT. The expansion and dominance growth of Information and Communication Technologies (ITC) and the COVID -19 pandemic have established a climate of change and reinvention of traditional government structures, creating a pathway for a new generation of modernized public services or e-governments. This paper aims to present an Integrated Disaster Risk Management (IDRM) system and the methodology for the implementation of action plans for each potential risk. The main contribution of this case study lies on a relational model based on a computer platform that captures the evolution of each risk according to the levels of probability and severity. The model is a comprehensive and integrated approach that focuses on the underlying conditions of disasters (hazard and vulnerability) and emphasizes multilevel, multidimensional, and multidisciplinary coordination among the parties involved, using dashboard tools as data visualization for decision making and citizen inclusion in those decisions.

Keywords. Risk Management, Digital government, hazard, severity, probability, Safety Management System.

1. Introducción

La pandemia de COVID-19 ha puesto de manifiesto el entorno variable del riesgo que afecta y amenaza a todos los sectores de la industria y a la sociedad, así como también, la necesidad de adoptar un enfoque de reducción del riesgo de desastres basado en la multiplicidad de peligros [1]. En este punto, también se deben tener en cuenta otros factores como los eventos climáticos extremos, asociados con una creciente

variabilidad y cambio climático, y el crecimiento demográfico originado por la migración y planificación urbana no organizada [2]. Estos eventos ocasionan pérdidas físicas, sociales y económicas, y en consecuencia, producen un impacto negativo a largo plazo en la sostenibilidad, principalmente de los países en desarrollo [3]. Por lo tanto, resulta necesario incorporar la Gestión Integral de Riesgos de Desastres (GIRD) y las acciones pertinentes para fortalecer la

Citación: E. Meléndez, J. Isaza, J. Castillo, R. González, I. Chang y A. García., Gestión de riesgos de desastres municipal basado en las TIC: Caso de estudio Panamá, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 18, no. 1, pp. (no modificar), 2022.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 31 de agosto de 2021. **Recibido con correcciones:** 27 de febrero de 2022. **Aceptado:** 27 de febrero de 2022.

DOI.

Copyright: 2022 E. Meléndez, J. Isaza, J. Castillo, R. González, I. Chang y A. García. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

resiliencia de las personas, para salvar vidas, proteger, restaurar, reconstruir los medios de vida y mantener los ecosistemas de los que dependen de manera sostenible [4].

En este escenario, se ha evidenciado no sólo en Panamá, sino a nivel internacional un incremento con respecto a la frecuencia y severidad de los desastres y las amenazas naturales. Debido en gran parte a factores relacionados con el cambio climático [2]. Ante este hecho, muchos países han puesto en marcha medidas políticas, legales, técnicas, económicas e institucionales para reducir los efectos destructivos en la vida y en los modos de vida de las personas y las comunidades.

Los desastres no se pueden eliminar, pero se pueden gestionar con mayor eficacia [5]. Por lo tanto, la gestión exitosa de las situaciones de emergencia requiere una planificación adecuada, una respuesta orientada y esfuerzos bien coordinados en todo el ciclo de vida de la gestión de desastres [6], [7]. Los responsables de la coordinación para dar respuesta a estos eventos se enfrentan a difíciles retos, lo que supone un esfuerzo complejo y dinámico que abarca la gestión de las prioridades, las capacidades, los lugares y las expectativas de los gobiernos y de la población. Además, la imprevisible naturaleza de las situaciones ocasionadas por el desastre, da lugar a una sobrecarga de información en las personas y en los sistemas de gestión, que puede obstaculizar la toma de decisiones [8].

En este contexto, los factores ambientales externos, como la pandemia de COVID-19 y los progresivos avances tecnológicos, han impulsado un proceso de transformación digital en los diferentes sectores de la industria, entre ellos el sector público [9], [10]. La adopción de Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) en los servicios gubernamentales y la gobernanza ha sido una de las estrategias de mayor relevancia de los diferentes gobiernos alrededor del mundo [11–13]. Las mismas suponen una oportunidad para incrementar la productividad y mejorar el nivel de vida de las personas [14]. Con el propósito de dirigir sus esfuerzos hacia una nueva generación de servicios públicos modernos, en donde el gobierno está enfocado en la integración orgánica y articulada de estructuras, relaciones funcionales, métodos y procedimientos para promover una mayor interactividad y sensibilidad a las necesidades de la población [15], [16]. Sin embargo, esta visión de un gobierno centrado en los ciudadanos se ve a menudo reducida por el alcance de los cambios radicales

en los procedimientos administrativos públicos cruciales y fundamentales.

Este trabajo tiene como objetivo diseñar la visualización integral de los esfuerzos técnicos y políticos en la búsqueda común por reducir los riesgos y promover las alianzas, coordinación estratégica e integración entre el gobierno local, la sociedad civil, la academia y el sector privado. En este sentido, el mismo presenta la implementación de la metodología de administración de peligro que plantea el Sistema de Gestión de la Seguridad (Safety Management System - SMS) [17], como soporte y plan piloto a la GIRD de los municipios para la realización y seguimiento de los planes de acción por cada riesgo potencial identificado en Panamá. Del mismo modo, está relacionado con la formulación de estrategias de prevención continua procurando ciudades cada vez más sostenibles, de manera que a través de este trabajo se fortalezcan las bases de un sistema como iniciativa para la gestión de un gobierno electrónico. Adicional, se incorporó un panel de datos (dashboard) que permite dar seguimiento visual en tiempo real a la información más relevante generada por las actividades gubernamentales en materia de gestión de riesgo de desastres.

El resto del documento está organizado de la siguiente manera. La sección 2 describe el SMS y presenta el sistema de gestión de riesgos propuesto. A continuación, la sección 3 presenta el caso de estudio aplicado en Panamá. Por último, la sección 4 concluye el artículo y señala las directrices para futuros trabajos.

2. Sistema de gestión de riesgos propuesto

El sistema de gestión de riesgos propuesto contempla un conjunto de elementos, medidas y herramientas dirigidas a la identificación del peligro en su etapa inicial, con el fin de aplicarle ciertos criterios de acuerdo con la naturaleza de la gestión de cada municipio. Por lo tanto, se puede analizar y valorar el nivel de riesgo que representa para la comunidad según la amenaza o la vulnerabilidad, con el fin de disminuir o mitigar los riesgos existentes. Adicionalmente, el sistema desempeña un papel delimitador en la toma de decisiones, cuyo objetivo es intervenir principalmente ante la ocurrencia de un desastre, es decir, que contempla tanto los preparativos para la atención de emergencias, así como también la respuesta y la reconstrucción una vez que ocurra un suceso. De manera que permita articular los diferentes tipos de intervención, dándole un papel principal a la prevención-mitigación del riesgo.

Nuestra propuesta utiliza el Sistema de Gestión de la Seguridad (Safety Management Systems - SMS) [17] para la evaluación de riesgo de cada proyecto o situación que pueda ser capaz de introducir cambios que hagan vulnerable a las barreras definidas dentro de un municipio o región del país.

2.1 Sistema de Gestión de la Seguridad (SMS)

El SMS busca la identificación temprana de peligros y amenazas para definir planes de acción que ayuden a mantener un nivel de riesgo aceptable. Por eso, más que una metodología, un SMS debidamente implementado dentro de una organización se integra en su cultura como un elemento relevante a considerar en la toma de decisiones en los diferentes niveles de ésta [18].

Como sistema estructurado para la toma de decisiones en materia de gestión de riesgos de seguridad, el SMS es un proceso evolutivo en la gestión de la seguridad, con un enfoque formal de arriba abajo de toda la organización, para gestionar y garantizar la eficacia de los controles del riesgo de seguridad. Incluye procedimientos, prácticas y políticas sistemáticas para la gestión de los riesgos[19].

La figura 1 muestra las principales etapas del SMS y se describen a continuación.

- **Identificación de los peligros.** Permite definir los peligros potenciales y poner en práctica medidas de mitigación apropiadas para garantizar la existencia de un nivel aceptable de riesgo. Es importante la capacitación de los actores claves y la comunidad sobre el proceso de identificación de peligros.
- **Evaluación del Riesgo.** Esta etapa establece los criterios para evaluar los peligros y analizar su riesgo. Luego, se desarrolla una plataforma web con éstos, con el fin de estandarizar el proceso y procurar la objetividad a la hora de valorar el nivel de riesgo de los peligros identificados. Se capacita al personal en el uso de las herramientas disponibles.
- **Mitigar el Riesgo.** Luego de obtener una valoración del nivel de riesgo se necesitan definir planes de acción enfocados en minimizar el nivel de riesgo. Se recomienda a los gestores de riesgo periódicamente valorar si el nivel de riesgo a cambiado o se mantiene.



Figura 1. Etapas del Sistema de Gestión de la Seguridad.

Si se mantiene o a desmejorado se recomienda volver a definir planes de acción.

- **Comunicar.** Proceso que determina el éxito del modelo, informar a los involucrados las acciones implementadas y las lecciones aprendidas permite crear un entorno de colaboración y sentido de pertenencia de la comunidad dentro del sistema.
- **Seguimiento.** Se recomienda reuniones trimestrales o semestrales según lo defina la oficina de gestión para monitorear el desempeño del sistema.

2.2 Descripción de los componentes sistema de gestión de riesgo de desastre propuesto

El sistema propuesto cuenta con cuatro componentes principales, como se muestra en la figura 2, el Gestor de riesgos de desastre, el módulo de Evaluación del peligro, el módulo de Mitigación del riesgo y el módulo de monitorización y revisión. Cada uno de los componentes lleva a cabo una función específica, y en conjunto permiten realizar la evaluación de riesgo de desastre de la situación a evaluar. Se deben tener en cuenta actividades claves para que el modelo funcione, estos son:

- Capacitación del gestor de riesgo municipal.
- Identificación de los actores claves dentro del municipio.

- Levantar lista de eventos históricos en el municipio para tener un punto de partida.
- Comunicación de los eventos y los avances del sistema.

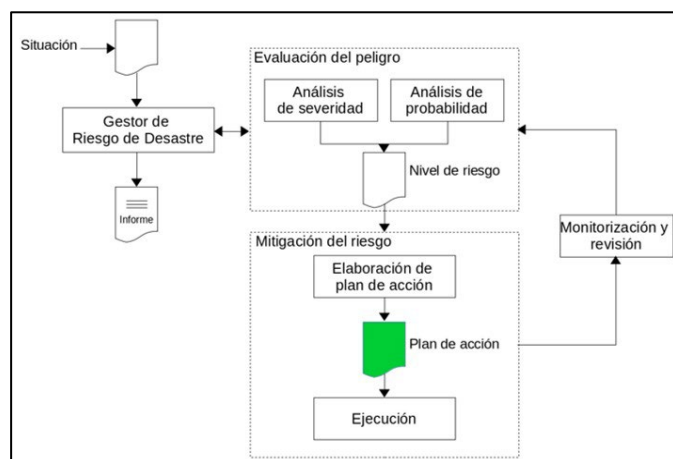


Figura 2. Sistema de gestión de riesgo de desastres propuesto.

A continuación, se explica con mayor detalle cada uno de los componentes. El Gestor de riesgos dirige la evaluación global de los peligros o amenazas identificadas para cada situación planteada, así como también la generación y clasificación de los resultados. El módulo de Evaluación del peligro determina el tipo de riesgo de acuerdo con los niveles de severidad y probabilidad establecidos. Una vez identificado el tipo de riesgo (que pueden ser *sin riesgo*, *riesgo bajo*, *riesgo medio* o *riesgo alto*), el módulo de Mitigación del riesgo elabora y pone en marcha el plan de acción de acuerdo con su clasificación. Por ejemplo, si la clasificación del tipo de riesgo resulta “*sin riesgos*” entonces no requiere plan de acción. Por su parte, en los casos en donde la clasificación resultante sea “*riesgo bajo*”, “*riesgo medio*” o “*riesgo alto*” las acciones a realizar pueden contemplar desde un plan de monitoreo hasta el establecimiento de planes de acción inmediato, que por lo general pueden contemplar un período de tiempo de tres a seis meses.

En cuanto al módulo de Monitorización y revisión es el encargado de dar seguimiento a la ejecución y cumplimiento de las medidas contenidas en los diversos planes acción. También, verifica y redirecciona hacia una nueva evaluación de riesgo en los casos en donde el plan de acción definido no esté dando los resultados esperados.

En este contexto en particular, la Evaluación del Riesgo $ER(S_x)$ trata de medir el nivel de riesgo del

peligro identificado. Para ello, se tienen en cuenta dos factores: los niveles de severidad y la probabilidad de ocurrencia de un evento. Ambos factores se expresan mediante los términos correspondientes en la siguiente definición:

$$ER(S_x) = \frac{\sum S_n + P_n}{\sum n} \quad (1)$$

Como se define en la ecuación 1, el primer término está definido por el coeficiente S_n , y corresponde a la clasificación de los niveles de severidad del proyecto S_x . El segundo término, definido por el coeficiente P_n , describe el nivel de probabilidad. La $ER(S_x)$ es la rata evaluación de riesgo, el cual corresponde a la suma de los niveles de severidad y la probabilidad dividido entre la suma del número de niveles de ambos parámetros $\sum n$, siendo n el número de niveles.

2.3 Clasificación de los niveles de severidad y probabilidad

Las tablas 1 y 2 muestran la clasificación y ponderación de los niveles de severidad y probabilidad, respectivamente. En donde los niveles de severidad se analizan en base a cinco (5) factores que pueden verse afectados ante la ocurrencia de un evento provocado por un peligro no gestionado. Por otro lado, la probabilidad considera el número de veces que la amenaza ha causado un evento en el municipio.

Para la implementación del modelo SMS dentro de los municipios se considera un ambiente similar al de una organización, donde los ciudadanos representan a cada uno de los colaboradores de esta. Los ciudadanos tienen la misión de identificar y comunicar al municipio los peligros latentes en sus comunidades. El gestor de riesgos municipal debe promover los canales de comunicación y capacitar a la población para lograr la mayor participación posible en la GIRD.

En una primera etapa de implementación se considera a los representantes como los voceros de los ciudadanos, involucrando a cada uno de los actores principales de las GIRD (bomberos, hospitales, policías, SINAPROC, entre otros) en la valoración de la severidad y probabilidad de la situación presentada. A continuación, se describen los cinco factores contemplados en los niveles de severidad y los criterios que los define:

Tabla 1. Clasificación de los niveles de severidad del riesgo

Valor del índice	Daños al ciudadano	Daños a la infraestructura de la comunidad	Impacto al medio ambiente	Afectación económica	Daños a la imagen municipal
0	Sin lesiones	No hay daños	Sin impacto	Sin afectación	Sin implicaciones
1	Lesiones leves sin afectaciones de su calidad de vida	Daños menores	Impacto menor	Afectación menor	Atención Distrital
2	Lesiones o enfermedad con incapacidad personal	Daño Mayor	Impacto mayor	Afectación mayor	Atención Provincial
3	Uno o más muertes	Catastrófico	Catastrófico	Catastrófico	Atención Nacional

- **Daños al ciudadano.** Dentro de esta clasificación se selecciona la ponderación de cero (0) si la amenaza valorada no tiene las condiciones para afectar la calidad de vida del ciudadano. Para la clasificación uno (1) se establece lesiones leves si la amenaza valorada puede causar lesiones que no requiere de un tratamiento médico o quirúrgico para su sanación, sino solamente una asistencia facultativa, o de simple vigilancia o seguimiento. Para la clasificación dos (2) se establece lesiones mayores si la amenaza valorada considera lesiones que requieren de un tratamiento médico o quirúrgico para su sanación. Generalmente producen una debilitación permanente y funcional en la salud de quién la padece. La clasificación tres (3) una o más muerte se define cuando la amenaza es capaz de generar pérdida de la vida. Cabe resaltar que si se aplica la matriz a una situación de forma preventiva es importante considerar el histórico de eventos similares ocurridos en el municipio con elementos en común a la situación actual valorada.
- **Daños a la infraestructura de la comunidad.** La clasificación cero (0) no hay daños, se define cuando la amenaza valorada no es capaz de registrar daños materiales a la infraestructura de la comunidad. La clasificación (1) correspondiente a daños menores se establece cuando los daños que puede causar la amenaza valorada no requieren más de una semana para ser reparados y que la comunidad vuelva a la normalidad. La clasificación dos (2) correspondiente a daños mayores se seleccionada cuando la amenaza valorada involucra daños que requieren evaluación, seguimiento y en algunos casos corresponde a reubicación de afectados para reparar los daños estructurales por un período de tiempo. La clasificación tres (3) catastrófico, corresponde cuando la amenaza valorada tiene el potencial de causar daños

que no permiten habitar nuevamente el lugar a menos que se inviertan grandes sumas de dinero y se realicen estudios que aseguren que el lugar es habitable.

- **Impacto al medio ambiente.** La clasificación cero (0) correspondiente sin impacto la amenaza no tiene las condiciones para causar cambios o una alteración al medio ambiente. La clasificación uno (1) impacto menor se refiere cuando la amenaza puede causar un impacto temporal, que durante un tiempo determinado no tiene consecuencias graves y el medio ambiente se puede recuperar relativamente rápido. La clasificación dos (2) impacto mayor se refiere a cambios persistentes al medio ambiente que tienen influencia a largo plazo. La clasificación tres (3) catastrófico se aplica cuando el impacto en el medio ambiente es irreversible, tiene tanta gravedad y transcendencia que impide por completo que el medio ambiente pueda recuperarse de los daños causados.
- **Afectación económica.** La clasificación cero (0) sin afectación se considera cuando la amenaza no requiere inversión económica para la recuperación de su impacto. La clasificación uno (1) afectación menor se selecciona cuando se requiere inversión para la recuperación del impacto de la amenaza en la comunidad. La clasificación dos (2) afectación mayor se considera cuando la amenaza puede causar pérdidas de ingresos para las familias en la comunidad. La clasificación tres (3) catastrófico el impacto es tal que aumenta las condiciones de pobreza en la comunidad.
- **Daños a la imagen municipal.** La clasificación cero (0) sin implicaciones significa que la amenaza no tiene el potencial de afectar la imagen del municipio. La clasificación uno (1) atención distrital se selecciona cuando el impacto es tal que sólo requiere acción de las autoridades del municipio para su recuperación. La clasificación dos (2) atención provincial se selecciona cuando el impacto es tal que necesita el soporte y la intervención de las autoridades de la provincia para su recuperación. La clasificación tres (3) atención nacional se define cuando el impacto es tal que se necesita que el presidente de la república nombre una comisión para atender los efectos de la amenaza.

En cuanto a los criterios de la probabilidad del riesgo estos se contemplan considerando el histórico de los eventos que han tenido lugar en la localidad de cada municipio bajo el principio que si ya ocurrió una vez significa que las condiciones del municipio son propicias

para su ocurrencia. En este sentido, la clasificación cero (0) desconocido pero posible en el país, significa que el evento posible ante la amenaza analizada no ha tenido ocurrencia, pero se está dando en países bajo condiciones similares a Panamá. La clasificación uno (1) conocido en el país, corresponde cuando la amenaza ha causado eventos similares al que se quiere evitar en el municipio en otras regiones del país. La clasificación dos (2) se produjo en el distrito, significa que dentro del histórico de eventos del municipio se tiene evidencia de por lo menos un evento similar al que se busca evitar. La clasificación tres (3) reportado más de tres veces al año en el municipio, se seleccionada cuando se tiene registros de un evento recurrente.

Tabla 2. Clasificación de los niveles de probabilidad del riesgo

Valor del índice	Probabilidad del riesgo
0	Desconocido pero posible en el país
1	Conocido en el país
2	Se produjo en el distrito
3	Reporte más de tres veces por año en el municipio

3. Plan piloto: Municipio de Las Tablas

El estudio se centró en la identificación de los peligros más relevantes, en la evaluación de la amenaza y recomendación de tiempo estimado para definir y cerrar plan de acción para mitigación del riesgo. Estos puntos fueron evaluados en conjunto con la comisión de Gestión Integral de Riesgo de Desastre y Desarrollo Comunitario (CGIRDDC-AMUPA) para garantizar las metas requeridas. Del mismo modo, la identificación de los actores claves para la gestión de riesgo y su reducción en el municipio de Las Tablas que usualmente forman parte de éstos: organismos sindicales, organizaciones no gubernamentales y empresariales como Cruz Roja, SINAPROC, Policía Nacional, MIDES, MEDUCA, Fuerza de Tarea Conjunta, MINSA, Club de Leones, entre otros. En el caso del Municipio de Las Tablas, se recopilaron algunos datos de contacto, de los actores claves identificados, como el teléfono, correo y dirección de esas instituciones para que estén dentro de la base de datos del gestor de riesgo municipal. Luego, se procedió con la adecuación y actualización de la arquitectura del sistema de gestión de riesgo, así como también el diseño

de una plataforma tecnológica como soporte del gestor de riesgo.

3.1 Arquitectura del sistema de gestión de riesgo

Para la implementación del sistema diseñado para el municipio de Las Tablas se tomaron en cuenta diversos factores que contemplan desde la arquitectura informática hasta la capacitación y seguimiento del personal dedicado a la GIRD. En este sistema, la Plataforma Municipal para la Gestión de Información Territorial denominada en Reducción de Riesgo de Desastre (RRD) llamada PLAMUNGIT, tiene como propósito permitir de forma colaborativa la recolección de data, su procesamiento y gestión, a fin de satisfacer las necesidades de información geográfica, ambiental, social y territorial, requerida por las instituciones municipales, sociedad civil, universidades y empresa privada, para de esta manera colaborar en el fortalecimiento de la agenda de reducción de riesgo a desastre.

La figura 3 muestra la arquitectura de la Plataforma PLAMUNGIT, se trata de una arquitectura cliente-servidor, en donde el acceso al sistema se puede realizar desde las estaciones de trabajo de forma local o desde cualquier dispositivo de forma remota. La base datos está alojada en la nube con una copia de seguridad localmente.

3.2 Plataforma Tecnológica de soporte al Gestor de Riesgo

La plataforma PLAMUNGIT funge como herramienta de soporte al gestor de riesgo municipal de manera proactiva en la mitigación de los riesgos antes que éstos resulten en accidentes o incidentes.

Por lo tanto, el enfoque es evaluar el posible impacto que tendrá la amenaza al convertirse en un evento. Sin embargo, se puede utilizar para evaluar los eventos que han pasado dentro del municipio con el fin de motivar un análisis crítico que permita identificar la causa raíz del evento y que permita definir planes de acción que garanticen minimizar la probabilidad de ocurrencia.

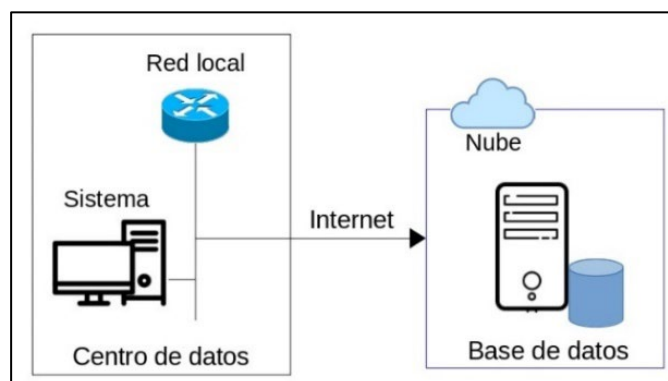


Figura 3. Arquitectura de la Plataforma Municipal para la Gestión de Información Territorial en RRD (PLAMUNGIT).

Esta herramienta utiliza el modelo de sistema de gestión de riesgo de desastres propuesto, descrito anteriormente (Ver figura 2), lográndose estandarizar y definir criterios unificados para establecer el nivel de afectación que tiene un peligro. El gestor de Riesgos Municipal accede al sistema y junto a los actores involucrados en la GIRD evalúan la situación y analizan la severidad de la misma basada en los criterios mencionado anteriormente en la tabla 1 y 2. Al seleccionar una de las opciones para cada criterio el sistema establece una valoración matemática dentro del rango del valor del índice de 0 a 3, lo que permite el cálculo del nivel de riesgo que tiene la amenaza analizada.

La probabilidad es el otro elemento que se evalúa en el modelo, según los criterios de la tabla 2, que representa la posibilidad de que la amenaza se convierta en un evento dentro del municipio. Inicialmente, se propone utilizar los datos históricos empíricos que se tengan sobre los eventos registrados según corregimiento del municipio de Las Tablas para el cálculo de la probabilidad. En otras palabras, según eventos previos y su nivel de ocurrencia, tiene impacto directo sobre el incremento de la ocurrencia del valor esperado.

Por otro lado, es importante aclarar que los peligros no se eliminan, sólo podemos mitigarlos y definir planes de acción que ayuden a mantener su riesgo en un nivel aceptable. Considerando que la herramienta desarrollada es dinámica, el equipo del proyecto capacitó al personal que designó la CGRDC.

Como se muestra en la figura 5 se incorporó un panel de datos (dashboard) que permite dar seguimiento visual en tiempo real a la información más relevante generada por las actividades gubernamentales. Por lo tanto, la

visualización inteligente de los datos de acuerdo con la información municipal en tiempo real ofrece datos específicos para todos los actores involucrados en la GIRD, incluyendo al ciudadano, lo que constituye un paso importante hacia una organización eficiente y centrada en el ciudadano.

La plataforma considera características como: definición de la entrada de datos, amigable e intuitiva, actualización sencilla, diseño con enfoque al crecimiento continuo, accesibilidad a la ciudadanía, fuente de datos que permita actividades de I+D+i, y fuente de información para caracterización de cada situación.

Para acceder al panel de datos, se tomó como punto de entrada la página web www.siglosrrd.org. Desde este sitio web, mostrado en la En la figura 4, los gestores de riesgo pueden compartir información sobre actividades de RRD por municipio, ingresar información de las amenazas y/o eventos que afectan a los municipios, evaluar su impacto y nivel de riesgo, alimentar el panel de datos, y acceso al mismo.

La página web mostrada en la figura 4 y el panel de datos de la figura 5 brindan a la ciudadanía la visualización de las acciones de gestión de riesgo por municipio, la información sobre el nivel de riesgo de las principales amenazas que afectan a su área y los diferentes planes de acción enfocados en mitigar su impacto y minimizar su nivel de riesgo, y el acceso a los contactos del personal clave del municipio relacionado a la gestión de riesgo y poder contactarle en caso de requerir alertar sobre una posible amenaza que se identifique.

Este sitio web ha sido construido utilizando el sistema de gestión de contenidos Wordpress. Esto hace posible agregar información de manera sencilla, a través de entradas asociadas a los municipios por medio del sistema de meta tags.

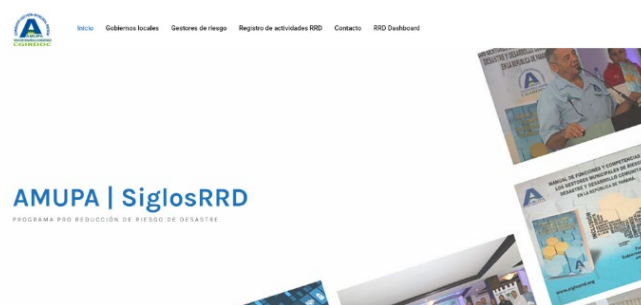


Figura 4. Página WEB de la Comisión de Gestión Integral de Riesgos de Desastre y Desarrollo comunitario.

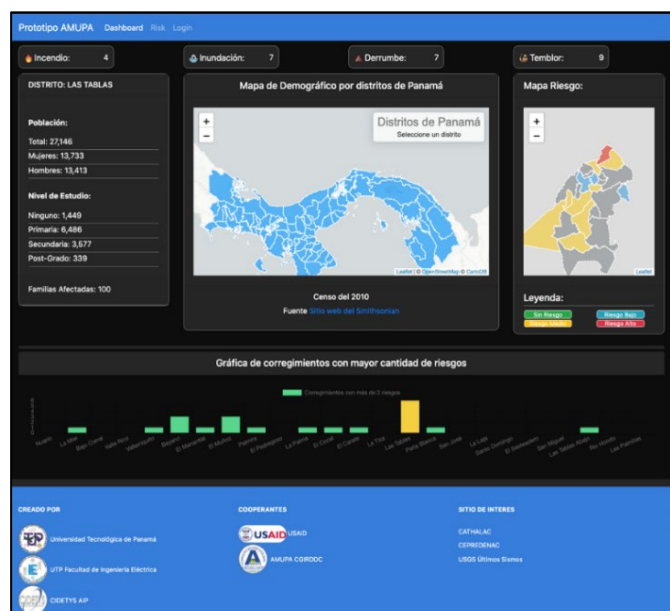


Figura 5. Panel de dato de soporte para la gestión integral de riesgo de desastre en los municipios de Panamá.

La capacitación sobre el uso de esta página web se puede hacer por medio de un video tutorial o de una sesión virtual. Es importante documentar ciertos datos relacionados a los eventos, por lo que se ha considerado que por cada evento se registre cierta información que ayudará a futuras investigaciones o medir el nivel de impacto cuantitativo del evento y soporte la evaluación de los criterios definidos para valorar el nivel de afectación usando la plantilla de la figura 6.

Por último, para mejorar la especificidad y sensibilidad del modelo y su variable respuesta que aparecen en la figura 7, es necesario definir los objetivos en materia de gestión de riesgo, capacitar al personal, establecer indicadores y realizar auditorías o evaluaciones a la gestión de riesgo que se hace en cada municipio.

Figura 6. Formulario de Recolección de datos para evaluar riesgos diseñado para los municipios de Panamá.

Además, con los objetivos específicos se debe identificar las amenazas, evaluarlas, utilizando el modelo propuesto, definir planes de acción para todos los riesgos con un nivel de riesgo medio y alto, y monitorear que estos planes de acción se cierran en el periodo establecido por la coordinación nacional.

Figura 7. Vista de pantalla de la plataforma para clasificación de Riesgos en municipio de Las Tablas.

4. Conclusiones

La implementación de las TIC en la Gestión Integral de Riesgo de Desastres en el Municipio de Las Tablas es un caso de estudio de transferencia de conocimiento e innovación, que ofrece la posibilidad de conectar grandes redes de personas y organizaciones a lo largo de extensas distancias geográficas dando lugar a rápidos flujos de información y comunicación en todo el país. Al implementar herramientas similares, se reduce el tiempo de respuesta y se mejora la toma de decisiones en respuesta del gobierno y los protocolos de actuación ante situaciones de emergencia.

La contribución a la Asociación de Municipios de Panamá (AMUPA) fue la adaptación de la metodología del SMS a su realidad, buscando proveerles una herramienta que les permita de forma proactiva

identificar sus peligros, analizar su nivel de riesgo y según esta valoración determinar cuáles peligros identificados requieren de un plan de acción a corto mediano y largo plazo. Este modelo permitirá a los municipios administrar sus recursos y dedicarlos a áreas de prioridad. Además, las capacitaciones brindadas a los gestores de Riesgos y el diseño de la plataforma facilitará la recolección de datos de los peligros, valoración de riesgo y planes de acción.

Este caso de estudio sienta las bases de un sistema de información integrado de gestión y reducción de riesgo de desastres en todos los municipios del país en miras de servir de referencia para otros municipios alrededor del mundo, lo que implica una selección oportuna del personal y la asignación de tareas, así como también, la creación de los mecanismos de organización y los espacios de discusión respectivos. Adicional, brinda una herramienta para la toma de decisiones en función de cada estrategia establecida por las autoridades, con base en la visualización inteligente de los datos de acuerdo con la información municipal en tiempo real. Por último, el factor de creación y aporte colectivo que se genera en este tipo de innovaciones ofrece una visión específica de la información para todos los actores involucrados en la GIRD y a su vez, lo que constituye un paso importante hacia una organización eficiente y centrada en el ciudadano.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Oficina de Asistencia Humanitaria de USAID (USAID/BHA) del Programa Regional de Asistencia para Desastres RDAP con el proyecto “AMUPA ASISTE: Hacia un modelo municipal más cercano con sus ciudadanos” (Ref: AID-OAA-C-15-00125).

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

FUTURAS INVESTIGACIONES

Se puede utilizar esta base para investigaciones orientadas hacia la experiencia de usuario y gestión de la calidad de herramientas de interacción con el ciudadano

para la gestión integral del riesgo municipal. Por otro lado, el modelo SMS pudiera considerarse para un modelo de optimización con el fin de minimizar el riesgo a través de la inclusión de otros factores y la revisión de restricciones matemáticas.

Por último, la investigación en sistemas similares a este para la toma de decisión asistida por inteligencia artificial éticamente responsivo con el uso de datos de ciudadanos que decidan compartir información certificada, denuncias ciudadanas y otros insumos de parte de los gestores de riesgo municipal.

REFERENCIAS

- [1] W. Khim, “Disaster risk reduction in times of COVID-19: What have we learned?,” *Disaster risk Reduct. times COVID-19 What have we Learn.*, no. August, pp. 2018–2021, 2020, doi: 10.4060/cb0748en.
- [2] S. Baas, S. Ramasamy, J. D. De Prick, and F. Battista, *Una Guía Sistemas de Gestión del Riesgo de Desastres*. 2009.
- [3] B. Pandey and K. Okazaki, “Community Based Disaster Management: Empowering Communities to Cope with Disaster Risks,” 2005.
- [4] W. Thomas, Matthew, J., “A Systematic Review of Insert Document Title the Effectiveness of Safety Management Systems,” *Aust. Transp. Saf. Bur.*, 2011.
- [5] S. Choe and F. Leite, “Assessing Safety Risk among Different Construction Trades: Quantitative Approach,” *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 143, no. 5, p. 04016133, May 2017, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001237.
- [6] Omar Darío Cardona Arboleda, “Medición de la gestión del riesgo en América Latina,” *Rev. Int. Sostenibilidad, Tecnol. y Humanismo.*, no. Número 3, pp. 1–20, 2008.
- [7] PNUD, “Conceptos Generales sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Contexto del País Experiencias y Herramientas de aplicación a nivel regional y local,” *Cuadernillos Gestión del Riesgo Desastr. a Niv. Reg. y local Conceptos*, pp. 1–28, 2012, [Online]. Available: https://www.preventionweb.net/files/38050_38050conceptosbsicos.pdf.
- [8] M. GUNDUZ and H. LAITINEN, “Construction safety risk assessment with introduced control levels,” *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 24, no. 1, pp. 11–18, Mar. 2018, doi: 10.3846/jcem.2018.284.
- [9] R. P. Dameri and C. Rosenthal-Sabroux, “Smart City and Value Creation,” in *Smart City: How to Create Public and Economic Value with High Technology in Urban Space*, R. P. Dameri and C. Rosenthal-Sabroux, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 1–12.
- [10] C. Kim and K. Kim, “The Institutional Change from E-Government toward Smarter City; Comparative Analysis between Royal Borough of Greenwich, UK, and Seongdong-gu, South Korea,” *J. Open Innov. Technol. Mark. Complex.*, vol. 7, no. 1, p. 42, Jan. 2021, doi: 10.3390/joitmc7010042.
- [11] S. Bouton et al., *How to make a city great*. New York, USA, 2013.
- [12] M. D. Hossain, J. Moon, J. K. Kim, and Y. C. Choe,

- “Impacts of organizational assimilation of e-government systems on business value creation: A structuration theory approach,” *Electron. Commer. Res. Appl.*, vol. 10, no. 5, pp. 576–594, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.elerap.2010.12.003.
- [13] R. G. Hollands, “Will the real smart city please stand up?,” *City*, vol. 12, no. 3, pp. 303–320, Dec. 2008, doi: 10.1080/13604810802479126.
- [14] F. Wahid, “The Current State of Research on eGovernment in Developing Countries: A Literature Review,” 2012, pp. 1–12.
- [15] J. Millard, J. Havlíček, I. Tichá, and J. Hron, “Strategies for the future eGovernment,” *Agric. Econ. (Zemědělská Ekon.*, vol. 50, no. No. 1, pp. 20–28, Feb. 2012, doi: 10.17221/5162-AGRICECON.
- [16] Y. Yun and M. Lee, “Smart City 4.0 from the Perspective of Open Innovation,” *J. Open Innov. Technol. Mark. Complex.*, vol. 5, no. 4, p. 92, Nov. 2019, doi: 10.3390/joitmc5040092.
- [17] D. Maurino, “Why SMS: An introduction and overview of safety management systems,” 2017, doi: 10.1787/31ebb8a3-en.
- [18] OACI, *Manual de gestión de la seguridad operacional (SMM)*. 2013.
- [19] FAA, “Safety Management System (SMS),” 2019. <https://www.faa.gov/about/initiatives/sms/>.

El cambio de fase como estrategia pasiva: Evaluación del rendimiento térmico-energético en edificaciones en Panamá

Phase Change as a Passive Strategy: Evaluation of the Thermal-energy Performance in Buildings in Panama

Diana Berrocal ¹, Rubí Aranda ¹, Steyci Santamaría ¹, Aníbal Vigil ¹, Miguel Chen Austin ^{1,2,3*}

¹ Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá VLS, Avenida Domingo Díaz, Ciudad de Panamá, Panamá

² Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología AIP (CEMCIT-AIP), Ciudad de Panamá, Panamá

³ Sistema Nacional de Investigación (SNI), Clayton, Ciudad de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: miguel.chen@utp.ac.pa

RESUMEN. Grandes esfuerzos han sido enfocados en hallar formas que permitan reducir el consumo energético, ya que actualmente la producción de energía es uno de los grandes contaminantes atmosféricos. Así, una estrategia que parece ser efectiva es la implementación de Materiales de Cambio de Fase (Phase Change Materials, PCM), que debido a su alta cantidad de energía tiene la capacidad de almacenar una cantidad significativa de energía. De aquí surge el objetivo de evaluar diferentes materiales de cambio de fase para determinar su influencia en la mejorar el confort interno de los edificios, y que no impacten negativamente al ambiente. Se lleva a cabo una revisión literaria sobre la aplicación de materiales de cambio de fase como elemento pasivo en la construcción de edificios y las mejoras energéticas que brinda. Se detallan las metodologías utilizadas en las simulaciones y experimentos llevados a cabo en otras investigaciones, así como la descripción de los materiales de cambio de fase estudiados. Se identifican los criterios de evaluación utilizados los cuales permiten analizar el comportamiento energético de los materiales de cambio de fase, y se describe su desempeño energético. Finalmente, se evalúa el desempeño energético de cinco materiales de cambio de fase, bajo el clima de la Ciudad de Panamá, por medio de una simulación realizada en DesignBuilder, basados en los mismos indicadores de desempeño antes establecidos, de donde se obtiene que el material de cambio de fase PCM1 es el que presenta mejor desempeño.

Palabras clave. *Materiales de cambio de fase, almacenamiento de energía, estrategia pasiva, masa térmica, simulación.*

ABSTRACT. Great efforts have been focused on finding ways to reduce energy consumption, since energy production is currently one of the major atmospheric pollutants. Thus, one strategy that seems to be effective is the implementation of Phase Change Materials (PCM), which due to their high latent heat can store a significant amount of energy. From this arises the objective of evaluating different phase change materials to determine their influence in improving the internal comfort of buildings, and that they do not negatively impact the environment. A literature review is carried out on the application of phase change materials as a passive element in building construction and the energy improvements it provides. The methodologies used in the simulations and experiments carried out in other investigations are detailed, as well as the description of the phase change materials studied. The evaluation criteria used to analyse the energetic behavior of the phase change materials are identified, and their energetic performance is described. Finally, the energy performance of five phase change materials is evaluated, under the climate of Panama City, by means of a simulation performed in DesignBuilder, based on the same performance indicators previously established, from which it is obtained that the phase change material PCM1 is the one that presents the best performance.

Keywords. *Phase change materials, energy storage, passive strategy, thermal mass, simulation.*

1. Introducción

Debido a las preocupaciones por el medio ambiente, el inevitable cambio climático durante los últimos años,

Citación: D. Berrocal, R. Aranda, S. Santamaría, A. Vigil y M. Chen, El cambio de fase como estrategia pasiva: Evaluación del rendimiento térmico-energético en edificaciones en Panamá, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 18, no. 1, pp. (no modificar), 2022.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 30 de junio de 2021. **Recibido con correcciones:** 6 de diciembre de 2021. **Aceptado:** 17 de diciembre de 2021.

DOI.

Copyright: 2022 D. Berrocal, R. Aranda, S. Santamaría, A. Vigil y M. Chen. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

y el Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se han dedicado grandes esfuerzos en hallar formas que permitan reducir el consumo energético, ya que actualmente la producción de energía es uno de los grandes contaminantes atmosféricos. El confort térmico de los ocupantes está relacionado con la capacidad de almacenamiento térmico de las paredes, las cuales tienen mayor capacidad entre más gruesas sean. Sin embargo, existen algunas restricciones que llevan a la construcción de paredes cada vez más ligeras para aligerar los costos [1]. El uso de medios activos para alcanzar el confort de los ocupantes se encuentra restringidos por el antes mencionado Acuerdo de París. Así, una estrategia que parece ser efectiva es la implementación de Materiales de Cambio de Fase (Phase Change Materials, PCM), que debido a su alta cantidad de energía tiene la capacidad de almacenar una cantidad significativa de energía, lo que usado correctamente puede ayudar a reducir las temperaturas internas de un recinto y a su vez su demanda energética. Esto los hace más eficientes que los materiales convencionales, al minimizar las tasas de transferencia de calor en las horas pico y eliminar las variaciones en la temperatura interna de un recinto [2].

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (EIA) [3], el consumo energético en edificios en 2015 era cerca del 20% de la energía producida a nivel mundial, y según la Oficina de Ahorro Energético en Edificios de Singapur [4], más del 50% de la energía que consume un edificio se debe al acondicionamiento del aire. De aquí surge la motivación de llevar a cabo investigaciones sobre métodos pasivos para la climatización, como lo es la investigación de diferentes materiales en el sector de la construcción que permitan mejorar el confort interno de los edificios, y que no impacten negativamente al ambiente. Es por esto que, en el presente trabajo se hace una revisión literaria sobre diversos experimentos y simulaciones de distintos materiales de cambio de fase, que demuestren su uso pasivo para mejorar la masa térmica de un recinto. Se describe la metodología utilizada para la selección de artículos, se define el concepto de PCM, se analiza la metodología utilizada para su estudio, se listan los PCM más estudiados en las investigaciones, se definen los criterios de evaluación, se analizan la evaluación del desempeño de diversos PCM. Finalmente se desarrolla una simulación dinámica energética para analizar el comportamiento de cinco

PCM utilizados en las diversas investigaciones encontradas.

2. Revisión de la literatura

2.1 Definición de PCM

Los materiales de cambio de fase (Phase Change Materials, PCM), tienen alta capacidad de almacenamiento de energía debido a su elevado calor latente que representa la cantidad de energía que almacena un material mientras ocurre cambio de fase ante una temperatura determinada. Así, al introducir PCM como un elemento de construcción ocurre almacenamiento y liberación de energía, dependiendo de las condiciones ambientales externas, lo que permite amortizar las variaciones de temperatura en el interior del recinto y a su vez reduce los requerimientos de acondicionamiento del aire.

Los PCM más utilizados son los orgánicos, específicamente los de parafina, ácidos grasos y polietilenglicol (PEG), debido a que tienen alta cantidad de energía y estabilidad química. Sin embargo, tienen la desventaja de baja conductividad térmica lo que reduce la capacidad de explotación del elevada cantidad de energía [5]. Los PCM pueden incorporarse a la estructura de forma directa, siendo impregnados en el yeso, hormigón o concreto, o también puede ser encapsulado microscópicamente en cápsulas de polímeros formando una especie de polvo [6-10]. Debido a que durante el cambio de fase dicho PCM pasará a una fase líquida, deben evitarse fugas [3],[5]. Es por esto que el producto final se distribuye como un panel, o incluso se ha implementado su uso junto a polímeros para obtener geles las cuales tienen mayor estabilidad mecánica durante su cambio de fase [11-12].

2.2 Implementación de materiales de cambio de fase como estrategia pasiva en edificaciones

La mayor parte de las investigaciones han sido desarrolladas a través de simulaciones, siendo la principal herramienta el software EnergyPlus, el cual es un programa completo para simular el comportamiento energético de edificios [13], y fue desarrollado por el Departamento de Energía (Department of Energy, DOE) en USA. Tal es el caso de Evola, et al. [5], quienes realizaron una simulación dinámica para observar el comportamiento de paneles de PCM microencapsulados en un edificio de oficinas para diferentes zonas climáticas en Europa, durante el verano.

Li, et al. [14], también utilizaron este software para simular el comportamiento energético de edificios ligeros con y sin PCM instalados, utilizando como data climatológica entrante la proveniente del observatorio meteorológico JTR13C. Un trabajo similar fue la simulación llevada a cabo por Rahimpour, et al. [15], quienes modelaron edificios ligeros, de ladrillos y de peso ligero mejorados con PCM en diversas ciudades australianas. Mohd et al. [16], incluyeron el uso del aire acondicionado y simularon su uso durante las 24 horas, y durante el horario de oficina en Putrajaya, Malasia. En el caso de Arce, et al. [17], se utilizó EnergyPlus en conjunto con SketchUp y OpenStudio para crear el modelo con PCM y evaluar su comportamiento en diferentes localidades. La investigación de Auzeby, et al. [18], utilizó el software de simulación dinámica DesignBuilder [19], el cual es una de las interfaces más sencillas del EnergyPlus.

Adicionalmente se han desarrollado simulaciones utilizando el método de diferencias finitas como Cao, et al. [20], quienes usaron el enfoque de equilibrio energético con condiciones límite para simular el efecto que tiene la adición de PCM microencapsulado, o en su otra investigación Cao, et al. [21], que consideró que no hay intercambio de calor con el suelo, se asume que el techo y el piso están aislados, no hay generación de calor y se omite la convección del PCM fundido.

En cuanto a las experimentaciones, Laaouatni, et al. [1], construyeron una pared de bloque con PCM sol-gel en sus cavidades y tubos para ventilación, a la cual aplicaron calor de un lado por medio de una resistencia y se usaron termopares para medición de la temperatura en diversos puntos. Jahangir, et al. [22], construyeron una pared sándwich cuya capa intermedia contenía PCM, las paredes eran de cemento en un caso, y de ladrillo y yeso en el otro. Utilizaron agua caliente para simular el ambiente de alta temperatura, y agua a temperatura ambiente para simular el ambiente de confort. Li, et al. [23], construyeron una pared convencional de ladrillo, y una pared con una capa de PCM.

El PCM orgánico la parafina, es el más utilizado en la mayoría de los artículos científicos revisados. Tal es el caso de Evola, et al. [5], quienes trabajaron con un panel de parafina micro encapsulada en matriz de panel; Auzeby, et al. [18], cuyo PCM consistía de parafina encapsulada en polietileno de alta densidad; Laaouatni, et al. [1], que también utilizaron una mezcla de parafina

y estireno polímero, pero en forma de sol-gel; Jahangir, et al. [22], usaron cera de parafina P56-58; Arce, et al. [17], utilizaron PCM (Dupont Energain) [13-14], y PCM de Parafina Octadecante C18. Cao, et al. [20], desarrolló un primer estudio sobre una pared de hormigón geopolímero con microcápsulas Rubitherm PSDVB/RT27 y comerciales Microtek MPCN24D (MF/PCM24), que tienen un núcleo de parafina, y posteriormente desarrolló un estudio con la misma pared geo polímero, pero en una configuración sándwich en la cual la capa intermedia es de PCM21, conocido como RT21 y cuyo núcleo es de parafina. También se han trabajado con BioPCM en forma de láminas delgadas donde se encapsula el PCM, y Manta BioPCM fabricado por Phase Change Energy, [15,16].

De la revisión literaria realizada se encontró que las investigaciones de PCM inorgánicos estaban destinadas a la creación de nuevos materiales de este tipo como en el caso de Guo, et al. [24], quienes desarrollaron un compuesto a base de calcio (sólido - líquido) nombrado PCM-Ca, el cual contiene hexahidrato de cloruro de calcio, el modificador tetrahidrato de nitrato de calcio y como agente nucleante el hexahidrato de cloruro de estroncio. También Yang, et al. [25], trabajaron en el desarrollo de un PCM inorgánico de polietilenglicol (PEG) y sol de sílice como vehículo poroso inorgánico.

2.3 Criterios de evaluación

Los criterios de evaluación son aquellos parámetros que permiten comparar el comportamiento del PCM y determinar si estos son efectivos y en qué condición son más eficientes. En la literatura revisada se observa que el criterio de evaluación más utilizado es la temperatura interna del recinto, la cual es medida y comparada con valores de referencia para observar si hay un verdadero acercamiento a la temperatura de confort interna. Otros criterios de evaluación preferidos son la ubicación del PCM en el recinto y cómo afecta ésta a su comportamiento; la frecuencia de activación, que indica durante cuánto tiempo el PCM se encuentra cambiando de fase y es menor en países con alta irradiación solar debido a que esta intensidad acelera el proceso de cambio de fase y produce un menor aprovechamiento; el espesor del PCM en paredes sándwich; el uso de ventilación para optimizar el desempeño del PCM; la capacidad de explotación del PCM, la cual se mantiene en valores razonables siempre que este sea elegido de acuerdo al clima de la zona donde es utilizado; y, la demanda

energética para refrigeración, y cómo esta disminuye al utilizar PCM.

Adicionalmente, se ha observado que se tiende a evaluar el comportamiento del PCM junto a otros materiales. Por ejemplo, se ha evaluado el flujo de calor máximo que se da en materiales convencionales, y comparado con el flujo de calor máximo que se da en un PCM. De igual manera, se ha colocado PCM junto a aislantes térmicos y se ha evaluado cuál de los dos materiales debe colocarse primero para aumentar su eficiencia.

2.4 Determinación del desempeño de varios PCM

El desempeño de los PCM se evalúa en función de los criterios de evaluación antes mencionados. Para lograr comparar adecuadamente los diversos resultados obtenidos, se clasifica esta sección según cada uno de los criterios de evaluación establecidos.

2.4.1 Temperatura interna del recinto

Al evaluar la temperatura interna del recinto se demostró a través de la simulación desarrollada por Evola, et al. [5], que la simple implementación del PCM permite disminuir la temperatura interna en 0.5°C en el pico operativo, y en 1°C en las horas medias del día, cuando se usó paneles de PCM de parafina encapsulada en microesferas poliméricas en un edificio de oficinas en diferentes localidades de Europa. Por otro lado, los resultados de Auzaby, et al. [18], indican que si bien es cierto el uso de PCM no mantiene la temperatura interior en el valor deseado (25°C en UK), sí se nota que los picos de variación de la temperatura disminuyen, por lo que la temperatura interna de la casa se mantiene más cerca de la temperatura deseada que sin el uso de PCM. Un resultado similar halló Cao, et al. [20], quienes demostraron por medio de simulación con el método de diferencias finitas que la inclusión de PCM en una pared de hormigón reduce la variación de la temperatura interna, y que a medida que se aumente la concentración del PCM en la pared, aumenta su capacidad de almacenamiento de energía, y por consiguiente, se reduce las fluctuaciones de la temperatura interna de la casa.

En China, el estudio desarrollado por Ling, et al. [26], demostró que la capacidad de los PCM de almacenar calor cuando una casa verde (greenhouse) aumentaba su temperatura, permitía el mejoramiento de la temperatura interna del aire. Un resultado similar se obtuvo del experimento desarrollado por Laaouatni, et al. [1],

quienes al encender una resistencia eléctrica a un costado de una pared de bloques con PCM de mezcla de parafina y estireno polímero en sus cavidades, y evaluar las mediciones tomadas por los termopares, se observó que a pesar de que la resistencia eléctrica alcanzara los 64°C a las 5 horas, del lado interno del bloque la temperatura máxima percibida era de solo 26°C , es decir, el PCM había absorbido gran parte de la energía en vez de dejarla pasar al recinto. A las dos horas y media de haber detenido el calentamiento, las temperaturas en todos los sensores habían caído y se estabilizaron alrededor de la temperatura de cambio de fase.

Resultados similares se hallaron por Li, et al. [14], quienes simularon una pared sin PCM (modelo 1) y una pared con PCM (modelo 2), para diferentes localidades (Harbin, Beijing, Shanghai y Guangzhou), y distintas estaciones. Encontraron que en temporada de invierno no había mayor diferencia en la temperatura interna del recinto entre los dos modelos, que en la temporada de transición se reducía la fluctuación de la temperatura en el modelo 2, y en la temporada de verano había un mejoramiento de esta temperatura interna del recinto en localidades con clima cálido ya que se da un mejor almacenamiento de calor.

2.4.2 Ubicación del PCM

Evola, et al. [5], determinaron, en base a la Intensidad de incomodidad térmica (Intensity of Thermal Discomfort, ITD), que el uso de PCM en las paredes internas produce un mejor ambiente que su uso en el techo, y está relacionado con que las paredes tienen mayor área y están expuestas al Sol directamente más tiempo que el techo, y por tanto se explota el uso del PCM. El mismo resultado se obtuvo por Auzaby, et al. [18].

Un enfoque diferente fue llevado a cabo por Jahangir, et al. [22], donde se determinó que entre más cerca esté un panel de PCM al lado caliente de la pared mejor será su explotación. Esto se determina al observar que cuando el PCM se ubica más lejos del lado caliente de la pared se disminuye su capacidad para derretirse debido a su alto punto de fusión. Un estudio similar fue llevado a cabo por Cao, et al. [21], donde se obtuvo resultados similares. Sin embargo, esta consideración debe ser tomada en cuenta dependiendo del PCM que se utilice.

2.4.3 Frecuencia de activación

Es un parámetro que refleja el tiempo durante el cual el PCM se encuentra cambiando de fase y puede ser utilizado como una medida de eficiencia del PCM. Este valor suele ser menor en países donde hay alta irradiación solar debido a que esta elevada intensidad acelera el proceso de cambio de fase lo que produce un menor aprovechamiento [5]. Esto queda demostrado en el estudio de Evola, et al. [5], donde la Frecuencia de activación tiene valores de 96% en París (ciudad al norte de Europa), y 35% en Catania (ciudad al sur de Europa). Esto significa que, en las ciudades al norte del continente europeo, donde hay menor irradiación, el PCM se mantiene más tiempo cambiando de fase. El mismo resultado se obtuvo por Auzéby, et al. [18].

2.4.4 Espesor del PCM en paredes sándwich

Cao, et al. [21], desarrollaron una simulación donde se varía el espesor de un PCM utilizado como capa intermedia en una pared sándwich, y generaron una gráfica que muestra su impacto en el consumo energético. Se puede observar que al utilizar un mayor espesor de PCM se puede disminuir la energía de consumo, y a su vez aumentar la resistencia y la capacidad de almacenamiento de calor de la pared. Un resultado similar se obtuvo por Rahimpour, et al. [15].

2.4.5 Uso de ventilación

En el experimento de Laaouatni, et al. [1], donde se rellena las cavidades de una pared de bloque con PCM sol-gel y se colocan tubos para ventilación, se observa que la temperatura antes del tubo ventilado sube hasta 48°C y cae rápidamente a 30°C en 3 horas, y luego se estabiliza. La temperatura después del tubo ventilado sube únicamente hasta 27°C, es decir el PCM ni siquiera cambia de fase, lo que demuestra que el tubo ventilado ayuda en gran medida a la liberación de la energía.

2.4.6 Capacidad de explotación del PCM

En la simulación de Evola, et al. [5], se utilizó dos PCM con temperatura de fusión diferente, siendo el PCM con matriz de abeja y cera de parafina el de mayor temperatura de fusión. Se observa que este PCM con matriz de abeja y cera de parafina ofrece una reducción del 51% en la intensidad de incomodidad térmica (ITD), mientras que el PCM más ligero sólo logra una reducción del 29%. Esto es debido a que la simulación fue ejecutada para un periodo de verano en el que las temperaturas son

más elevadas, por tanto, no es posible explotar la capacidad del PCM ligero. Esto refleja la importancia de la adecuada selección del PCM según la región climática del edificio.

2.4.7 Demanda energética para calefacción y refrigeración

De la simulación desarrollada por Arce, et al. [17], donde se compara un recinto sin PCM y otro con PCM se observa que la demanda de refrigeración disminuye cuando se emplea PCM, en todas las localidades estudiadas (Antártica, Letonia, Líbano, Mali y Turquía).

2.4.8 Comportamiento del PCM frente a materiales convencionales evaluando el flujo de calor máximo

Jahangir, et al. [22], compararon el comportamiento energético de un PCM de cera de parafina P56-58 frente al ladrillo, arena y aire, y encontraron que tanto el PCM, como el ladrillo tenían un mejor comportamiento energético que la arena y el aire. Su implementación es más apropiada para reducir las variaciones de temperatura. El flujo de calor general exhibe una tendencia similar a la reportada por Hasan, et al. [27], quienes determinaron que la integración de una capa de PCM reduce el flujo de calor máximo.

Por otro lado, Li, et al. [17], estudiaron el comportamiento de una pared de ladrillo, frente a una pared de ladrillo con una capa de PCM. Se encontró que la temperatura de la superficie interior de la pared con el PCM es menor que la temperatura de la superficie interior de la pared de referencia. De igual manera, se halló que el flujo de calor en la pared con PCM es menor que la pared de referencia.

3. Materiales y métodos

Luego de realizada la revisión de la literatura, se lleva a cabo una evaluación de diferentes materiales de cambio de fase aplicados en la envolvente, a través de simulación dinámica. La simulación se realizó en el software DesignBuilder v6.1.6.011, para un edificio de oficinas (Figura 1) con área de piso de 400 m² y 3.5 m de alto. El estudio se realizó con la zona climática de Panamá [28], en donde el lugar específico para el análisis fue: Ciudad de Panamá (tipo de clima Awí acuerdo con la clasificación de Köppen). Según los datos meteorológicos de Solargis©, la zona de estudio tiene una temperatura promedio anual de 27.2 °C y una humedad relativa de 78%. Panamá tiene dos estaciones a

lo largo del año: seca (enero a marzo) y lluviosa (abril a diciembre).

Las paredes están compuestas de varias capas (Tabla 1), donde la capa PCM hace referencia a la zona donde se ubicó el PCM en estudio. La simulación fue llevada a cabo para cinco de los materiales de cambio de fase estudiados por los investigadores. Estos son: Cera Parafina P56-58, RT21 (PCMC21), PCM1, Dupont Energain y BioPCM.

Tabla 1. Capas de la pared y periodo de tiempo utilizado en las simulaciones.

Capas de pared en las simulaciones ¹	
Material	Espesor (m)
0.75 in. Stucco o repello (Capa externa)	0.0190
XPS Extruded Polystyrene – CO2 Blowing	0.0897
PCM ²	0.0742
Gypsum Plasterboard (Capa interna)	0.0130
Periodo de tiempo para las simulaciones	
23 de marzo-30 de marzo ³	
Notas:	
¹ El orden de las capas de la pared es en forma descendente.	
² En los cinco materiales de cambio de fase se utilizó el mismo espesor.	
³ Se eligió este periodo ya que presenta mayores temperaturas en el exterior según los datos meteorológicos [1],[28].	

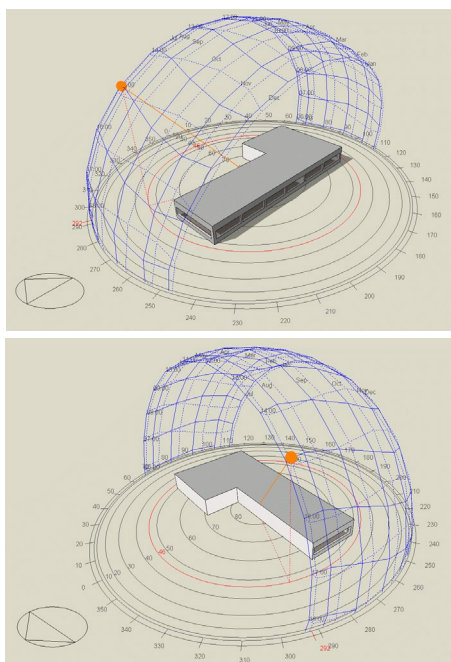


Figura 1. Edificio de oficina para evaluación: Vista frontal (arriba) y vista posterior (abajo).

Donde se evalúan diversos parámetros como las variaciones de la temperatura interna, la influencia del espesor del PCM y el ahorro en la carga energética por refrigeración (anual).

Tabla 2. Resumen de data meteorológica típica usada para simulación.

Día crítico por mes	T _{máx} (°C) Hora	T _{mín} (°C) Hora	HR _{máx} (%) Hora	HR _{mín} (%) Hora	Velocidad de viento (m/s)	Dirección de viento (°)
Enero 3	35.0 15:00	23.9 6:00	94 5:00	44 15:00	0.43	126
Febrero 20	34.6 15:00	22.2 6:00	93 6:00	40 15:00	2.77	85.67
Marzo 17	35.6 15:00	24.9 6:00	73 6:00	36 16:00	2.3	49
Abril 11	35.3 15:00	24.8 6:00	82 00:00	44 16:00	1.75	87
Mayo 20	34.8 15:00	24.5 6:00	90 6:00	53 16:00	0.87	83.3
Junio 23	32.8 15:00	23.4 6:00	94 6:00	58 15:00	0.45	108.25
Julio 21	35.5 16:00	24.3 5:00	97 4:00	49 16:00	0.3	89.3
Agosto 19	34.7 15:00	24.1 6:00	95 5:00	52 15:00	3.9	188
Septiembre 1	32.5 15:00	23 6:00	98 00:00	60 15:00	2.1	83
Octubre 20	32.5 15:00	23 6:00	96 6:00	62 14:00	2.33	90.67
Noviembre 11	32.9 15:00	23.7 6:00	94 5:00	61 13:00	2.55	80
Diciembre 16	34.3 15:00	24.6 6:00	94 6:00	50 16:00	4.2	34.5

T: Temperatura, HR: Humedad relativa, máx: valor máximo, mín: valor mínimo.

Es necesario decir, que los valores que presentan un rango se simuló con un valor promedio del rango expuesto. En la Tabla 2, se muestran las diferencias de temperatura de cambio de fase o temperatura de fusión para los materiales que serán analizados. En la misma se puede observar que la mayor temperatura de fusión es presentada por la cera parafina P56-58 (57°C), y la menor es del material de cambio de fase PCM1 con una temperatura de fusión de 22°C.

4. Análisis de resultados y discusión

Como se indicó anteriormente el criterio de evaluación más utilizado en los estudios analizados es el de la temperatura interior del recinto, y es el primer criterio de evaluación utilizado aquí.

Al analizar la pared del sur o la pared más larga durante dos días, se puede observar que los materiales de cambio de fase estudiados tienen variaciones en la temperatura de hasta 2.2°C (Figura 2(a)-(e)). Sin embargo, el material de cambio de fase PCM1 (Figura

2(d)), presenta una alta conservación de la temperatura interior en el recinto a comparación de los materiales de cambio de fase RT21 (Figura 2(e)) y Dupont Energain (Figura 2(c)). Adicionalmente, se puede observar la temperatura externa en la figura 2(f), y determinar que en todos los casos la temperatura interna del recinto no superó las temperaturas exteriores durante el día. La Cera Parafina P56-58 tuvo un comportamiento similar al indicado por Jahangir, et al. [22], en algunas horas del día (7:00 a 12:00). Con ello se puede indicar que la Cera Parafina P56-58 puede mejorar la masa térmica de una forma eficiente, ya que puede mantener la temperatura interior del recinto hasta 3°C más baja que la temperatura exterior.

Más en detalle, se puede observar un desfase temporal entre los valores máximos de las temperaturas interiores de cada escenario con cada diferente PCM y la exterior, de aproximadamente seis horas, excepto para el BioPCM con sólo cinco horas de desfase. Este comportamiento térmico comparable se puede explicar en base a sus propiedades térmicas (Tabla 2), donde cada PCM presentan valores similares de conductividad y capacidad calorífica sensible (ρc_p) y latente. El BioPCM presentando valores menores de estas propiedades, resulta en un menor retardo de la penetración del calor hacia el interior. Por otro lado, diferencias significativas se observan en los valores de temperatura interior alcanzados.

Tabla 2. Propiedades de los materiales de cambio de fase evaluados.

PCM	Punto de fusión (°C)	Densidad ρ (kg/m³)	Conductividad térmica (W/mK)		Cantidad de energía (kJ/kg)	Calor específico c_p (J/kg K)	
			Cambio de f .	Sol. a Liq.		Sólido	Líquido
Cera Parafina P56-58	42-72	900	0.25		250	1840	--
RT21 (PCMC21)	21.08	825	0.20		148	3420	1170
PCM1 ¹	18-26	1300	0.25	0.5	178.5	1785	
PCM-Ca (PCM a base de calcio)	21.8	-	1.2401	0.64-0.82	155.5	Not. ³	
Dupont Energain	25	885	0.018		-	2500	
Parafina Octadecante C18	28	814	0.23		-	1625	
PEG/SiO ₂ (CPCM)	42.4	-	1.3476-1.5316		121.03	-	
PCM2 ¹	29-31	1430 (20°C) 1230 (40°C)	0.6		160	-	
GPC con % de PS-DVB/RT27 (MPCM)							
0 % de MPCM	--	2199	1.35		100	891	
2.6 % de MPCM	23.3	2057	1.13		100	960	
5.2 % de MPCM	25.3	1875	0.87		100	1062	
GPC con % de MF/PCM24 (MPCM)							
0 % de MF/PCM24	--	2199	1.35		154	891	
2.6 % de MF/PCM24	23	2023	1.02		154	982	
5.2 % de MF/PCM24 ²	23.7	1875-1960	0.74		154	1125	
BioPCM	23	860	0.2		219	1620	
BioPCM Blanket M182/Q29	29	-	-		-	-	
PCM 60% de parafina	27.6	-	2.7		-	⁽⁴⁾	
PCM parafina microencapsulada	22.6	-	0.18-0.22		-	Not. ⁴	
BJUT (Parafina encapsulada en polietileno de alta densidad)	-	900	0.5		. ⁽⁵⁾	2900	
Cera Parafina y estireno polímero	28	-	-		245	-	

¹ El nombre de los PCM no se encuentra en los artículos, sus propiedades son distintas [14],[17].

² El GPC con la composición del MPCM fue utilizado en dos artículos, sin embargo, sus densidades difirieron [16],[18].

³ El cálculo del calor específico está dado por ecuaciones [23].

⁴ El calor específico es dado por una gráfica para ambos PCM [5].

⁵ La cantidad de energía se encuentra en una tabla dependiente de la temperatura [22].

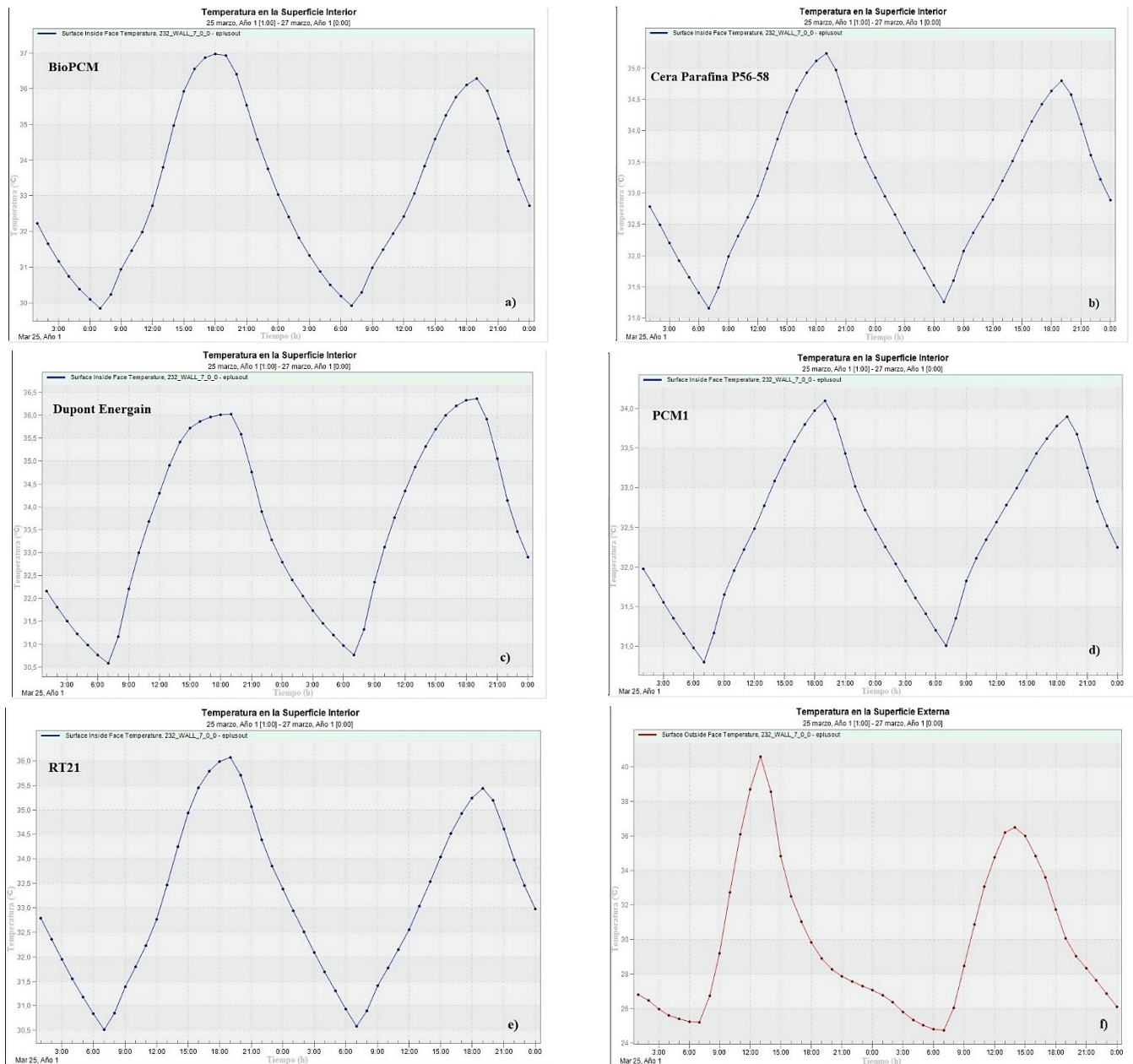


Figura 2. Temperaturas en el interior del recinto vs tiempo (líneas azules): a) BioPCM, b) Cera Parafina P56-58, c) Dupont Energain, d) PCM, e) RT21 f) Temperatura exterior del recinto vs tiempo.

Una comparación más profunda de estas diferencias encontradas se puede lograr mediante el monitoreo de la temperatura en la capa de cada PCM; sin embargo, las herramientas utilizadas aquí presentan esta limitante.

Al aumentar el espesor en los materiales de cambio de fase estudiados, se pudo observar que había variaciones mínimas en las temperaturas para los materiales Dupont Energain (Figura 2(b)) y Cera Parafina P56-58 (Figura 2(c)), las mismas se encontraban en un rango de 0.4°C a

2°C en algunas regiones del recinto en estudio durante la semana establecida. Sin embargo, para el material de cambio de fase PCM1 (Figura 2(d)), hubo una disminución significativa en la temperatura. En el estudio realizado por Li, et al. [14], se indica que este material de cambio de fase puede mejorar la estabilidad térmica en la pared porque controla las fluctuaciones de temperatura del aire interior en el recinto. También el material BioPCM (Figura 2(a)) presenta cambios significativos en

la temperatura al aumentar el espesor, esto se reafirma en el estudio realizado por Fabrizio, et. al [29], el cual estudió las variaciones de temperatura y del espesor de los BioPCM y encontró que se reducía la demanda de refrigeración. Por otro lado, el material RT21 (Figura 2(e)) muestra un comportamiento inverso al aumentar su espesor. Cao, et al. [20], estudió variaciones de espesor en este material de cambio de fase y determinó que había una reducción en la energía en el clima de Oslo, Noruega; por lo que se puede decir que este efecto es adverso en climas tropicales húmedos.

Para evaluar el criterio de carga energética por refrigeración se tomaron las cargas anuales de los cinco PCM. En la Figura 3, se observa el consumo energético del edificio sin PCM en la línea verde superior. Se muestra que, para los materiales PCM1, Dupont Energain y RT21 se tiene un menor consumo en la carga de refrigeración respectivamente. En los meses de enero y diciembre se presenta una mayor demanda en el consumo, mientras que para los meses de febrero, marzo, junio, agosto, septiembre y noviembre se muestra lo contrario esto se debe a las horas de ocupación del edificio de estudio y a las condiciones climáticas.

Los resultados del consumo energético cuando se dobló el espesor de cada PCM se muestran en la figura 4. De aquí, se observa que el consumo energético disminuyó considerablemente teniendo una menor carga por refrigeración.

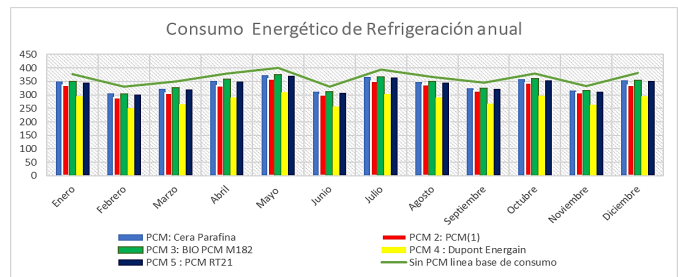


Figura 3. Consumo energético de refrigeración (kWh) de un Año para cada PCM.

Se hizo un análisis del ahorro energético anual para cada uno de los PCM estudiados, mediante los datos obtenidos de las figuras 3 y 4, y se evalúa el ahorro en el consumo energético de cada PCM con respecto al consumo energético sin los PCM. En la figura 5 se muestra el porcentaje promedio calculado del ahorro energético anual.

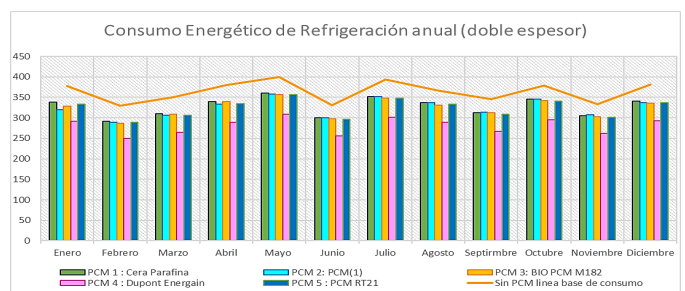


Figura 4. Consumo energético de refrigeración (kWh).

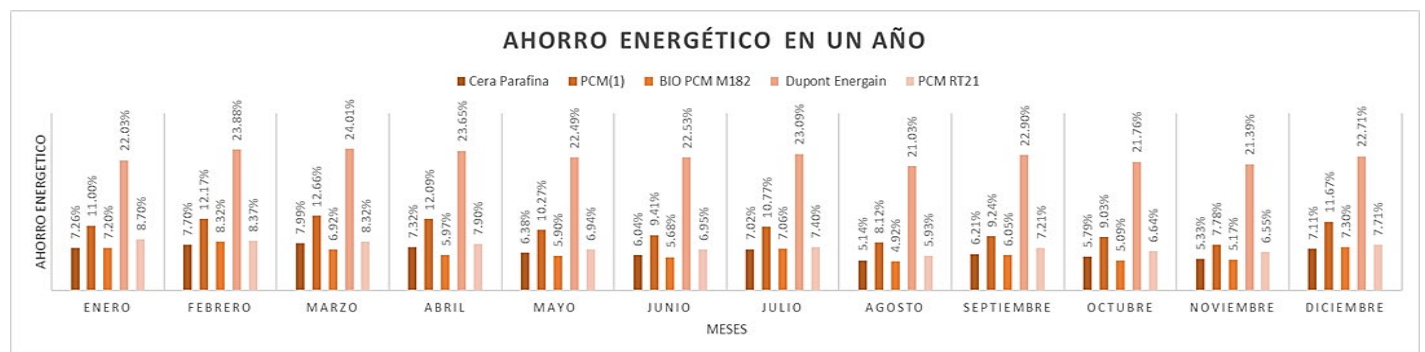


Figura 5. Porcentajes de ahorro energético en la carga de refrigeración de los PCM.

Como se puede observar en la figura 6, el PCM con mayor ahorro es el DuPont Energain con 22.62 % con respecto al consumo base del edificio sin PCM. Mientras que, uno de los que presentó menor ahorro es la Cera parafina con 6.61 %. Esto se debe a que su temperatura de cambio de fase es superior (57 °C) a la del clima de estudio por lo que se imposibilita que se produzca el

cambio de fase en este material. Otro que presentó menor ahorro fue el BIOPCM con 6.30 %.

Por otra parte, al realizar el análisis energético para el consumo de refrigeración doblándole el espesor (Figura 7 y 8) se obtuvieron mejoras en los resultados observando una disminución mucho mayor en el

consumo con respecto al uso del PCM sin doblar el espesor.

Se puede observar en la figura 7, al doblarle el espesor a cada PCM se tiene un aumento significativo en la Cera Parafina, BIO PCM y el PCM RT21, con 9.93%, 10.94% y 11.05% respectivamente. Mientras que el PCM 1 (10.70%) y el DuPont Energain (22.93%) el porcentaje de ahorro no aumento mucho, esto se debe a que a algunos PCM les favorece esta condición mientras que a

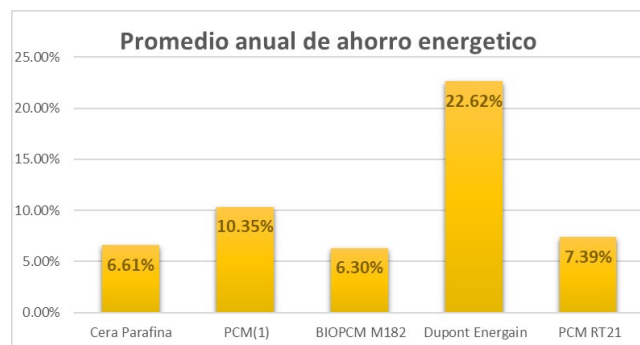


Figura 6. Promedio anual de ahorro energético (kWh) de los distintos PCM.

otros no, como se corroboró en otras investigaciones. Al realizar los dos análisis, se tiene que aplicando el doble del espesor a las capas de los PCM. El DuPont Energain obtuvo un (22.62%) y (22.93%) sin doblar el espesor y doblándolo, respectivamente. Este cumple con las condiciones climáticas seleccionadas y demostró un buen desempeño al ser evaluado por los indicadores de confort.

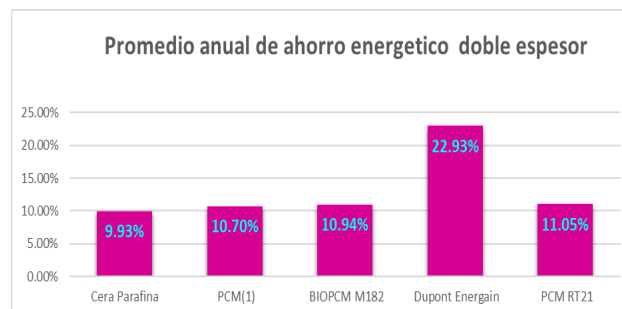


Figura 7. Promedio anual de ahorro energético (kWh) de los distintos PCM al doblarle el espesor.

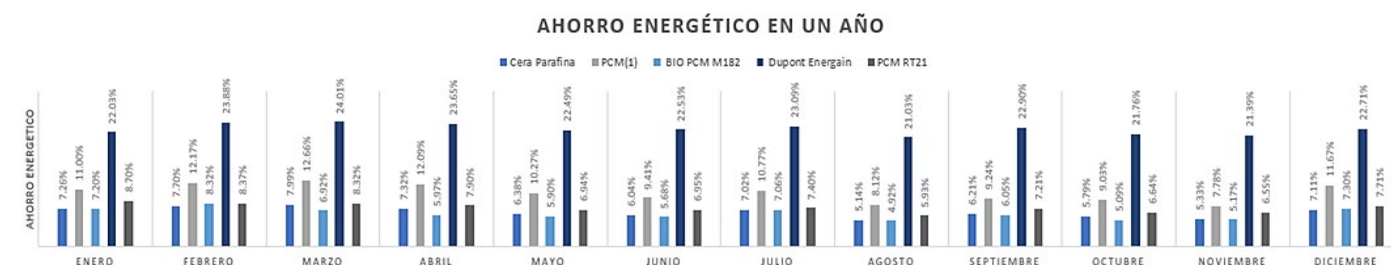


Figura 8. Porcentajes de ahorro energético en la carga de refrigeración al doblarle el espesor.

Por último, la validación experimental de estos resultados permitiría verificar el modelo y criterios empleados en este estudio. Sin embargo, se pretende su implementación a escala real en un futuro, debido a las limitantes en adquisición de recursos.

5. Conclusiones

Los materiales de cambio de fase han sido investigados por varios años para ser utilizados como un método pasivo para controlar la masa térmica de un recinto debido a su capacidad de almacenamiento de energía. Estos son distribuidos en forma de paneles, encapsulados, microencapsulados o en forma de sol-gel. Los PCM más utilizados en las investigaciones son orgánicos, específicamente de parafina, mientras que los PCM inorgánicos se encuentran en proceso de diseño y evaluación. De aquí surge el objetivo de evaluar diferentes materiales de cambio de fase para determinar

su influencia en la mejorar el confort interno de los edificios, y que no impacten negativamente al ambiente. Por lo cual, se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

- El software EnergyPlus es el más utilizado en investigaciones son llevadas a cabo a través de simulaciones, muchas veces por el alto costo de implementación de estudios experimentales.
- Los criterios de evaluación más estudiados son la temperatura interna del recinto, la ubicación del PCM y la frecuencia de activación.
- La aplicación de PCM en diversos escenarios ha demostrado una reducción en la entrada de calor al recinto, una reducción en la temperatura interna del recinto, y una reducción en la demanda de refrigeración. Esto pudo ser corroborado con la simulación realizada. De igual forma se puede indicar que el comportamiento de los diferentes PCM se

verán afectados con el clima del país donde se utilice, por lo cual, se debe tomar en cuenta el clima de la zona específica a utilizar para aprovechar la capacidad de almacenamiento de energía del PCM. Una comparación más profunda de estas reducciones y diferencias encontradas se puede lograr mediante el monitoreo de la temperatura en la capa de cada PCM; sin embargo, las herramientas utilizadas aquí presentan esta limitante.

- En muchas condiciones entre mayor sea el espesor de un panel de PCM se logra un mayor control de la temperatura interna del recinto, pero este caso no es factible en algunos materiales de cambio de fase, como es el caso del RT21.

- El material de cambio de fase el cual obtuvo un mayor ahorro energético fue el Dupont Energain con un 22.93%, debido a que su temperatura de cambio de fase es de 25°C, lo cual le permite realizar más ciclos completos. Por lo tanto, para climas cálidos este sería una buena opción para mitigar la demanda energética.

Se sugiere para próximas investigaciones evaluar el comportamiento energético de un edificio y los costos al utilizar materiales de cambio de fase junto a otras técnicas pasivas para el control de la masa térmica, para determinar si esta combinación ofrece un verdadero ahorro energético, y definir si es viable asumir los costos de construcción de los PCM, o si las otras estrategias pasivas ofrecen suficiente ahorro energético y no es necesario invertir en la implementación de PCM. De igual forma, se recomienda utilizar materiales de cambio de fase que presenten temperatura de fusión no tan altas, ni tan bajas para un clima tropical húmedo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de la Universidad Tecnológica de Panamá y de la Facultad de Ingeniería Mecánica, así como del grupo de investigación en Energía y Confort en Edificios Bioclimáticos (ECEB) <https://eceb.utp.ac.pa/>. Esta investigación forma parte del proyecto FID18-056, de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT). Se extiende el agradecimiento al Sistema Nacional de Investigación (SNI).

REFERENCIAS

- [1] R. B. M. E.-O. y M. E.-G. A. Laaouatni N. Martaj, "Phase change materials for improving the building thermal inertia."
- [2] M. Song, F. Niu, N. Mao, Y. Hu, and S. Deng, "Review on building energy performance improvement using phase change materials," *Energy Build.*, vol. 158, pp. 776–793, 2018.
- [3] EIA, "International Energy Outlook 2017 Overview," vol. 143.
- [4] C. U. I. QI, "Office building energy saving potential in {Singapore}," 2006.
- [5] G. Evola and L. Marletta, "The Effectiveness of {PCM} Wallboards for the Energy Refurbishment of Lightweight Buildings," vol. 62, pp. 13–21.
- [6] V. V. Tyagi, S. C. Kaushik, S. K. Tyagi, and T. Akiyama, "Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review," vol. 15, no. 2, pp. 1373–1391.
- [7] V. D. Cao *et al.*, "Microencapsulated phase change materials for enhancing the thermal performance of Portland cement concrete and geopolymer concrete for passive building applications," vol. 133, pp. 56–66.
- [8] S. Ramakrishnan, X. Wang, J. Sanjayan, and J. Wilson, "Thermal Energy Storage Enhancement of Lightweight Cement Mortars with the Application of Phase Change Materials," vol. 180, pp. 1170–1177.
- [9] S. Ramakrishnan, X. Wang, J. Sanjayan, and J. Wilson, "Assessing the feasibility of integrating form-stable phase change material composites with cementitious composites and prevention of {PCM} leakage," vol. 192, pp. 88–91.
- [10] A. M. Borreguero, I. Garrido, J. L. Valverde, J. F. Rodríguez, and M. Carmona, "Development of smart gypsum composites by incorporating thermoregulating microcapsules," vol. 76, pp. 631–639.
- [11] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallée, and D. Quenard, "Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material," vol. 38, no. 6, pp. 673–681.
- [12] E. M. Alawadhi, "Thermal analysis of a building brick containing phase change material," vol. 40, no. 3, pp. 351–357.
- [13] » [En línea]. Disponible: <https://energyplus.net/>.
- [14] Y. Li, Y. Wang, X. Meng, M. Wang, and E. Long, "Research on Indoor Thermal Environment Improvement of Lightweight Building Integrated with Phase Change Material under Different Climate Conditions," vol. 121, pp. 1628–1634.
- [15] Z. Rahimpour, A. Faccani, D. Azuatalam, A. Chapman, and G. Verbič, "Using Thermal Inertia of Buildings with Phase Change Material for Demand Response," vol. 121, pp. 102–109.
- [16] W. I. W. M. Nazi, Y. Wang, H. Chen, X. Zhang, and A. Paul Roskilly, "Passive Cooling Using Phase Change Material and Insulation for High-rise Office Building in Tropical Climate," vol. 142, pp. 2295–2302.
- [17] M. E. A. Fariña, L. F. Garrido, F. M. T. Pastoriza, A. S. García, and G. M. Liroa, "Análisis de consumos energéticos de aislantes tradicionales y materiales de cambio de fase aplicados a contenedores marítimos para despliegues

- militares,” vol. 94, no. 6, pp. 626–631.
- [18] M. Auzaby *et al.*, “Using Phase Change Materials to Reduce Overheating Issues in {UK} Residential Buildings,” vol. 105, pp. 4072–4077.
- [19] DESIGNBUILDER, “{DesignBuilder} website.” 2016.
- [20] V. D. Cao *et al.*, “Thermal analysis of geopolymers concrete walls containing microencapsulated phase change materials for building applications,” vol. 178, pp. 295–307.
- [21] V. D. Cao, T. Q. Bui, and A.-L. Kjøniksen, “Thermal analysis of multi-layer walls containing geopolymers concrete and phase change materials for building applications,” vol. 186, p. 115792.
- [22] A. Laaouatni, N. Martaj, R. Bennacer, M. El Omari, and M. El Ganaoui, “Phase change materials for improving the building thermal inertia,” *Energy Procedia*, vol. 139, pp. 744–749, 2017.
- [23] R. J. Khan, M. Z. H. Bhuiyan, and D. H. Ahmed, “Investigation of heat transfer of a building wall in the presence of phase change material ({PCM}),” vol. 1, no. 2, pp. 199–206.
- [24] Y. Li, W. Liang, J. Zhou, and E. Long, “Experimental Study on Thermal Performance Improvement of Building Envelopes Integrated with Phase Change Materials in an Air-conditioned Room,” vol. 205, pp. 190–197.
- [25] “EnergyPlus.”
- [26] L. Guo, X. Yu, D. Gao, Y. Guo, C. Ma, and T. Deng, “Synthesis and thermal energy storage properties of a calcium-based room temperature phase change material for energy storage,” vol. 135, pp. 1–7.
- [27] J. Yang, J. Zhou, Z. Nie, and L. Liu, “Preparation and Property Analysis of Phase Change Concrete {PEG}/{SiO₂}-CPCM,” vol. 29, pp. 21–26.
- [28] H. Ling *et al.*, “Effect of phase change materials on indoor thermal environment under different weather conditions and over a long time,” vol. 140, pp. 329–337.
- [29] M. Hasan, S. Alam, and D. H. Ahmed, “Effect of phase change material on the heat transfer rate of different building materials,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1919, no. 1, p. 20029, 2017.
- [30] ETESA, “Hidromet.” 2009.
- [31] F. Ascione, N. Bianco, R. F. De Masi, F. de’ Rossi, and G. P. Vanoli, “Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: {Energy} savings and indoor comfort in the cooling season,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 990–1007, 2014.

Instructivo para autores

Guide for authors

Nombre del autor principal ^{1*}, Nombre de cada coautor ^{1,...,n}

¹ Unidad a la que está adscrito, entidad a la que está afiliado, País

^{1,...,n} Unidad a la que está adscrito, entidad a la que está afiliado, País

*Autor de correspondencia: ejemplo@ejemplo.com

RESUMEN– Todo trabajo debe presentar un resumen con un aproximado no más de doscientas cincuenta (250) palabras. Esta sección va después de la información de los autores y con su respectiva traducción al inglés. Utilice las palabras “RESUMEN” (español) y “ABSTRACT” (inglés) como títulos, alineados a la izquierda, en letra Times New Roman 12 puntos, tipo negrita y seguido de un guión. Luego, inicie el resumen en letra Times New Roman 9 puntos y espacio sencillo. Finalmente, mantener un espacio en blanco de 8 puntos y empiece a desarrollar el contenido del artículo. No modificar las líneas

Palabras clave– En esta sección se deben utilizar las frases “Palabras Clave” (español) y la palabra “Keywords” (inglés), alineadas a la izquierda, en letra Times New Roman 12 puntos, tipo negrita y seguido de un guión. Finalmente, debe incluir un máximo de siete (7) palabras clave o frases clave en letra Times New Roman 10 puntos, separadas por comas y en orden alfabético.

ABSTRACT– This section provides a sample of an abstract and keywords which conform to the formatting guidelines for Revista de I+D Tecnológico.

Keywords– Abstract, guidelines for authors, keywords, Revista de I+D Tecnológico.

1. Introducción

Este instructivo es una plantilla que el autor puede modificar para estructurar fácilmente su artículo según las disposiciones establecidas por el Comité Editorial (CE) de la Revista de I+D Tecnológico (RIDTEC) de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP).

El documento provee reglas de estilo que explican el manejo de ecuaciones, figuras, tablas, abreviaturas y siglas. Además, el autor encontrará secciones para preparar los agradecimientos y referencias.

2. Componentes del artículo

El contenido del documento debe limitarse a un máximo de doce (12) páginas, incluyendo texto, ilustraciones, gráficos y referencias. Por página se entiende una cara de papel tamaño carta ó 21.59 cm x 27.94 cm (8.5" x 11"). El cuerpo del artículo es a dos (2) columnas, cada una con 8.79 cm de ancho y 1.0 cm de espacio entre cada columna.

La configuración de los márgenes es la siguiente: Solo la primera página superior 3 cm, inferior 2.5 cm,

izquierdo 1.5 cm y derecho 1.5 cm. Y la configuración del encabezado de página es de 2 cm y el pie página es a 1.5 cm, ambos solo aplicados en la primera página.

A continuación, se detallan los componentes del artículo y formato de presentación.

2.1 Tipos de letra y estilos

Utilice un procesador de texto con el tipo de letra Times New Roman. Por favor, evite el uso de “bit-mapped fonts”.

2.2 Título

El título debe ser breve e informativo, reflejando el hallazgo contenido en el artículo y debe estar en Times New Roman 16 puntos, negrita y centrada. La primera palabra comenzará con letra mayúscula y de ahí en adelante se utilizará la mayúscula solamente para los nombres propios y símbolos químicos. Se evitará el uso de abreviaciones y siglas en el título, así como palabras innecesarias al principio del título, como por ejemplo: un, una, sobre, el, etc.

Citación: Primera_letra_nombre. Apellido, “Título_artículo”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 15, no. 1, pp. (no_modificar), 2019.

Tipo de artículo: No_modificar. **Recibido:** No_modificar. **Recibido con correcciones:** No_modificar. **Aceptado:** No_modificar.

DOI.

Copyright: 2019 Primera_letra_nombre. Apellido. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

El título debe contar con su respectiva traducción al inglés o al español, según el idioma base del artículo y tamaño de fuente a 14 puntos. Ejemplo: si el artículo está redactado en español entonces el título debe aparecer en español y luego en inglés o viceversa si es el caso contrario.

2.3 Nombre de los autores, afiliaciones y correo

Los autores y coautores deben escribir sus nombres de la misma forma como lo hacen en todas sus publicaciones y seguir el formato establecido al inicio del instructivo. Cada autor debe presentar la siguiente información: la unidad a la que está adscrito (departamento, centro de investigación, facultad, etc.); la entidad a la que está afiliado (universidad, empresa privada, etc.); el país al que corresponde y por último el correo del autor de correspondencia el cual debe estar indicado con un (*).

Los autores y coautores de la UTP deben utilizar el nombre completo de la universidad y sin traducirlo a otro idioma. En otras palabras, la entidad de afiliación es “Universidad Tecnológica de Panamá”. Esta medida contribuye positivamente en el conteo por entidad que realiza SCOPUS u otras herramientas, tales como: *Research ID*¹ y *WoS*².

2.4 Encabezado de Página de la primera página

No modificar.

2.5 Pie de página de la primera página

No modificar.

2.6 Cuerpo del manuscrito

Los componentes principales del manuscrito deben dividirse en secciones con un uso apropiado de títulos y subtítulos, según lo requiera la organización y el desarrollo lógico del material.

2.6.1 Texto principal

Escriba el texto principal en Times New Roman 11-puntos y a espacio sencillo. Los párrafos deben iniciar con una sangría de 0.5 cm. Además, el texto debe estar completamente justificado, **no** debe agregar espacios en blanco entre los párrafos de cada sección y los extranjerismos (solo aplica para artículo en español) no adaptados deben escribirse en cursiva.

2.6.2 Cabeceras de primer nivel, cabeceras de segundo nivel y viñetas

Una cabecera de primer nivel debe estar en Times New Roman 12 puntos, negrita, la letra inicial en mayúscula y a la izquierda de la columna. Ejemplo: ver el título de la sección 1 (introducción) del presente instructivo. Recuerde utilizar un punto (.) después de la numeración, no una coma (,). El texto del contenido va en la siguiente línea, recuerde mantener la sangría.

Una cabecera de segundo nivel debe estar en Times New Roman 11 puntos, negrita, la letra inicial en mayúscula y a la izquierda de la columna. Ejemplo: ver el título de la sección 2.3. El texto del contenido va en la siguiente línea, recuerde mantener la sangría.

Es importante indicar que estas especificaciones también aplican para las cabeceras de tercer nivel y su contenido. Además, la numeración de estas cabeceras no culminan con un punto. Las viñetas deben justificarse a la izquierda y a espacio sencillo. La sangría entre la viñeta y el texto es de 0.5 cm.

Nota: las secciones principales y subsecciones deben estar separadas mediante un interlineado sencillo (espacio en blanco) de tamaño 11 puntos. Además, escriba un texto entre el título de una sección y una subsección o entre subsecciones, no deje ese espacio en blanco, ver ejemplo entre las subsecciones 2.4 y 2.4.1.

2.6.3 Enumeración de páginas, encabezados y pies de páginas

Enumere sus páginas en el borde inferior derecho, ejemplo: 1, 2, 3,..., n páginas. No utilice encabezados ni pies de páginas. Si necesita pie de página, colóquelo en la parte inferior de la columna en la cual se hace referencia con el siguiente formato: Times New Roman de 9 puntos y espacio sencillo. Para facilitar la lectura, se recomienda evitar el uso excesivo de pies de página e incluir observaciones entre paréntesis, ejemplo: (como se ilustra aquí...).

2.6.4 Ecuaciones

Si está utilizando *Microsoft Word*, use *Microsoft Editor de Ecuaciones* o el complemento *MathType* (www.mathtype.com) para ecuaciones en su artículo. Las variables, números y texto deben ser en Times New Roman 11 puntos.

Pasos para insertar ecuaciones:

- Microsoft Editor de Ecuaciones: *Insert/Insertar - Object/Objeto - Create New/Crear Nuevo - Microsoft Equation/Microsoft Editor de Ecuaciones.*
- MathType: *Insert/Insertar - Object/Objeto - MathType.*

La ecuación debe estar centrada y con su correspondiente numeración alineada a mano derecha, como se muestra a continuación,

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1)$$

Enumere las ecuaciones en forma consecutiva entre paréntesis. Use paréntesis para evitar ambigüedades en los denominadores. Utilice punto al final de la ecuación cuando ellas sean parte de una oración, como

$$\int_0^2 F(r, \varphi) dr d\varphi = [\sigma_2 / (2\mu_0)] \cdot \int_0^\infty \exp(-\lambda |z_j - z_i|) \lambda^{-1} J_1(\lambda r_2) J_0(\lambda r) d\lambda. \quad (2)$$

Los símbolos de las ecuaciones deben ser definidos antes o inmediatamente después de la ecuación; utilice letra cursiva y 11 puntos. Para la definición utilice letra normal y 11 puntos. En cuanto a la referencia de la ecuación dentro del contexto del artículo deben ir en minúscula y sin punto al finalizar el texto. Por ejemplo: “En la ecuación 1 se muestra el resultado estimado” o “En la ecuación (1) se muestra el resultado estimado”.

No se aceptan las abreviaciones de las ecuaciones como: “a ec. (1)”, “eq. #1” o “ecuación N°1”. Además, las ecuaciones extraídas de fuentes externas deberán ser citadas en el texto.

2.6.5 Imágenes y fotografías

Las imágenes y fotografías deben estar centradas en el artículo formando parte del texto. En cuanto a numeración, título y leyenda, ver la siguiente sección.

Si alguno de los elementos mencionados no puede ser ajustado en las columnas, entonces debe centrarlo en la parte superior de la página con su respectivo título y leyenda. Después, deben seguir las columnas del artículo en la parte inferior.

Las fotografías e imágenes (tablas, diagramas, gráficos y ecuaciones) deben tener una resolución mínima de 300 ppp (píxeles por pulgada) o dpi (*dots per*

inch). Procure que la resolución de las imágenes facilite el envío del artículo a través de la plataforma.

No hay un límite en cuanto a la cantidad máxima de imágenes permitidas. Sin embargo, límitese a incluir las imágenes y ecuaciones más esenciales o novedosas.

Si su artículo es aprobado por el Comité Editorial para su publicación, entonces, debe seguir las instrucciones de la sección 4.

2.6.6 Leyendas de figuras y títulos de las tablas

Las leyendas de figuras y títulos de las tablas deben ser en Times New Roman de 10 puntos. La primera palabra de la leyenda debe iniciar con letra mayúscula. Las palabras “Figura” y “Tabla” deben ser en negrita, incluyendo el número de secuencia y el punto.

Las figuras y tablas deben enumerarse separadamente y llevar su respectiva secuencia, ejemplo: “**Figura 1.** Diagrama de control” y “**Tabla 1.** Mediciones en campo”. Las leyendas de las figuras se colocan *justificadas* debajo de la imagen y los títulos de las tablas se colocan *centrados* arriba de las tablas.

2.7 Secciones usuales de un artículo

Las secciones más usuales de un artículo científico, pero NO limitantes, son las siguientes:

2.7.1 Introducción

Debe ubicar al lector en el contexto del trabajo:

- La naturaleza del problema cuya solución o información se describe en el documento.
- El estado del arte en el dominio tratado (con sus respectivas referencias bibliográficas).
- El objetivo del trabajo, su relevancia y su contribución en relación al estado del arte.
- Descripción de la estructura del artículo.

2.7.2 Materiales y métodos

Es importante presentar el diseño y tipo de investigación, pasos de la investigación, materiales y métodos. Además, el autor debe incluir los criterios de la selección del material tratado, los controles, estudios planeados y realizados.

2.7.3 Resultados

Los resultados deben presentarse en orden lógico acorde a la metodología planteada. Usar tablas y figuras cuando sea posible para presentar los resultados de forma clara y resumida. Además, las referencias de

tablas y figuras dentro del contexto del artículo deben ir en minúscula y sin punto al finalizar el texto. Ejemplo: En la figura 2 se muestran las mediciones realizadas en el período de enero a marzo.

Tenga mucho cuidado en el texto del artículo al usar porcentajes o estadísticas con un pequeño número de muestras. Incorrecto: "El 60% (3/5) de las muestras de David y el 20% (1/5) de Santiago han demostrado resistencia a los medicamentos." Correcto: "Tres de cada cinco ejemplares de David y 1 de cada 5 ejemplares de Santiago han demostrado resistencia a los medicamentos."

Cuando un número empieza una oración entonces debe escribirlo en letras. Además, utilice numerales cuando las cifras sean mayores que 10.

Posterior a la presentación de los resultados, se destacarán y discutirán los aspectos más importantes del trabajo. Toda afirmación debe estar avalada por los resultados obtenidos. Y por último, comparar los resultados obtenidos con estudios previos.

Se recomienda extremar el poder de síntesis evitando repeticiones innecesarias. Además, las unidades numéricas con su respectiva magnitud deben estar unidas. Ejemplo: 30°C o 25%.

2.7.4 Conclusiones

Deben ser enunciadas con claridad y deben cubrir:

- Las contribuciones del trabajo y su grado de relevancia.
- Las ventajas y limitaciones de las propuestas presentadas.
- Referencia y aplicaciones de los resultados obtenidos.
- Recomendaciones para futuros trabajos.
- Impacto sobre la comunidad científica.

2.7.5 Agradecimiento

Utilice el término en singular como encabezado, aun cuando sean muchos agradecimientos. En esta sección se recomiendan las siguientes expresiones: "Agradecemos a Juan Pérez por su asistencia técnica" o "Agradecemos también a nuestro colaborador Carlos Pérez de la Dirección de Investigación en la Universidad Tecnológica de Panamá". El reconocimiento a patrocinadores por el apoyo financiero se indica en esta sección, ejemplo: "Este trabajo fue financiado por la Secretaría Nacional bajo contrato...".

2.7.6 Referencias

Las referencias se identificarán en el texto mediante números arábigos entre corchetes, alineados con la escritura. Se enumerarán por orden de aparición en el texto al final del trabajo. Las listas de referencias deben seguir el estilo de la **IEEE**. El autor tiene la libertad de utilizar un administrador de fuentes bibliográficas que incluyen los procesadores de texto o un *software* específico. La letra debe estar en Times New Roman 9 puntos.

El autor es responsable de la exactitud del contenido y citación de todas las referencias. Todas las referencias deben ser citadas en el documento. Los números de las referencias en el texto deben colocarse entre corchetes.

A continuación, se detallan algunos ejemplos de citaciones:

Citación de un artículo

- [1] G. Peveri. "Infrared Nation," *The International Journal of Infrared Design*, vol. 33, pp.56-99, Jan. 1979.

Citación de un libro

- [2] W.K. Chen. *Linear Networks and Systems*. Belmont, CA: Wadsworth, 1993, pp. 123-35.

Citación de un documento electrónico

- [3] A. Paul. (1987, Oct.). "Electrical properties of flying machines." *Flying Machines*. [Online]. 38(1), pp. 778-998. Available: www.flyingmachjournal/properties/fly.edu [Dec. 1, 2003].

2.7.7 Apéndice

El apéndice consiste en la presentación de cualquier otro material que impida el desarrollo continuo del artículo, pero puede ser importante para justificar los resultados del trabajo.

3. Normas para la recepción de los artículos

La RIDTEC es una **revista abierta** de publicación semestral, por lo tanto, extendemos una cordial invitación a todos los autores interesados en publicar artículos científicos (ver definición en la sección 4) sobre los avances y los resultados de sus proyectos de investigación.

Las áreas de investigación de interés, pero no limitantes, han sido definidas por la UTP con la finalidad de abarcar los campos del conocimiento a nivel internacional han identificado en los sectores económico, social, científico y tecnológico:

- Agricultura y Agroindustria
- Astrofísica
- Biotecnología

- Cambio climático y meteorología
- Ciencias físicas y sistemas ambientales
- Geología
- Hidrología tropical
- Infraestructura.
- Instrumentación nuclear
- Logística y Transporte
- Proceso de Manufactura y Ciencia de los Materiales
- Sistema marino costero
- Tecnologías de Energías Renovables e Ingeniería Ambiental
- Tecnologías de la Información y Comunicación.
- Robótica, Automatización e Inteligencia Artificial.

Los autores de artículos pueden ser docentes, investigadores, estudiantes universitarios de pregrado y postgrado con orientación de un profesor tutor. Además, los interesados pueden ser profesionales de entidades públicas (autónomas y semiautónomas) y entidades privadas, ya sean, nacionales e internacionales. Los estudiantes de pregrado con interés de publicar pueden enviar sus trabajos a la Revista de Iniciación Científica de la UTP (<http://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric>).

El autor puede encontrar en el portal de la RIDTEC (<http://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico>) los siguientes ítems:

- Miembros del CE.
- Ediciones anteriores.
- Instructivo para autores.
- Objetivos, alcance, misión y temática.
- Política editorial de la revista.
- Declaración de ética de publicación de la revista.
- Plataforma para la recepción de artículos.
- Fechas de convocatorias para la recepciones de los artículos.

El autor debe enviar una primera versión de su artículo durante el periodo establecido, y cumplir con los siguientes criterios de preselección:

Criterio 1

El autor debe utilizar el formato establecido en el instructivo para estructurar su artículo y enviarlo a través de la plataforma para la recepción de artículos. Los artículos recibidos en la plataforma, pasada la fecha límite de la convocatoria, pasarán al estatus de “espera” para formar parte de la próxima convocatoria. El archivo del artículo debe cumplir con las siguientes

características: formato .doc o .docx y no debe superar los 65MB.

Criterio 2

El artículo emitido debe corresponder a la cobertura temática de la RIDTEC, y abarcar las áreas temáticas orientadas a las ciencias e ingenierías.

Criterio 3

El artículo debe pasar por un proceso de comprobación de originalidad, la RIDTEC hace uso de la herramienta web Paper Rater (acceso libre) y el *software* de detección de plagio, el cual permite garantizar la originalidad del trabajo escrito antes de la publicación.

No existe un límite para el envío de artículos por autor. Sin embargo, si dos o más artículos de un autor son aceptados entonces solo se publicará un artículo por número y los demás artículos en los siguientes números.

Nota: El autor solo puede modificar o retirar el artículo antes de la fecha establecida para el corte de la recepción. Esto implica que el artículo no puede ser reemplazado durante el proceso de evaluación o retirado si es recomendado para su publicación.

4. Evaluación y aceptación de artículos

Cada artículo será evaluado mediante el método de “revisión por pares doble ciego”, para garantizar un proceso de evaluación libre de sesgo o conflictos de intereses. Los criterios de evaluación son los siguientes: Originalidad, Relevancia, Calidad y Presentación (redacción y claridad de las secciones). Cada criterio será calificado como: Muy Alto, Alto, Bueno, Suficiente, Promedio, Débil o Deficiente. Dependiendo de esta calificación, el evaluador elegirá una de las siguientes alternativas: 1) se recomienda con modificaciones menores, 2) se recomienda con modificaciones mayores o, 3) no se recomienda. Además, el evaluador emite sus observaciones y recomendaciones, las cuales van dirigidas al autor y también al comité editorial. Para sustentar la evaluación del manuscrito, al artículo se le asigna un puntaje (0, 1 y 2), donde 0 representa a consideración del evaluador, que el artículo no se recomienda, 1 si el artículo se recomienda con modificaciones mayores y 2 si se recomienda con modificaciones menores. De esta manera el puntaje dado por cada evaluador se suma y divide entre la cantidad de evaluadores asignados al artículo emitido a revisión, así el resultado es un

promedio que podría variar entre 0 y 2. Este promedio determina si un artículo tendrá prioridad para ser publicado. Los artículos que fueron aprobados, pero no publicados en el actual número, pasarán al estatus de “espera” hasta el próximo número. Los dictámenes finales serán emitidos por el Comité Editorial (CE) de la RIDTEC. Esto implica que el artículo no puede ser reemplazado durante el proceso de evaluación o retirado si es recomendado para su publicación, de lo contrario se aplicará un periodo de embargo (no podrá remitir artículos en la revista dentro de seis meses “un semestre”).

Si el dictamen final (opinión de ambos evaluadores y el CE) consiste en no recomendar un artículo para su publicación, se procede con devolverlo al autor con el informe de evaluación notificándole sobre las debilidades de fondo y forma. Un dictamen final de este tipo se sustenta con los siguientes puntos: el trabajo no incorpora el componente de ingeniería, deficiencias en la redacción y claridad de las secciones, no hay una contribución original y significativa al área del conocimiento. Sin embargo, si existe una contradicción entre los evaluadores entonces se recurrirá a un tercer evaluador para definir la evaluación.

En el caso de que el artículo sea recomendado para su publicación, se procede con devolver el artículo y el informe de evaluación. El autor debe mejorar el documento y remitirlo con la información de los autores en un plazo no mayor de **15 días** al correo electrónico revista.idtecnologico@utp.ac.pa

Posterior a la aceptación de los ajustes en el artículo por parte del CE, el autor principal recibirá una certificación sobre la publicación de su artículo en la RIDTEC. Además, el autor debe entregar los archivos al correo electrónico revista.idtecnologico@utp.ac.pa o enviar un disco (CD o DVD) con sus respectivas imágenes o gráficos originales para la diagramación del artículo. En el caso de enviar un disco, este debe incluir los siguientes datos:

- Número de identificación del artículo (ID)
- Título del artículo
- Nombre del autor principal.

¿Qué queremos decir con una "**imagen original**"? Según nuestras experiencias con ediciones anteriores, se recomienda generar un PNG o JPG de la imagen con el *software* utilizado para crear dicha imagen y con una resolución **mínima de 300 ppp**. Ejemplos del concepto

"original": si la imagen es creada en *Autocad* entonces usted debe generar el archivo PNG o JPG de la imagen a partir del *Autocad*.

No se recomienda exportar la imagen a otra aplicación para generar el PDF porque puede afectar considerablemente la calidad de la imagen y complicar la tarea de diagramación. Ejemplo: exportar la imagen del *Autocad* e importarla en *Word* o *power point*.

Cada imagen debe aparecer en un archivo PNG o JPG por separado y debidamente identificada para facilitar el reemplazo en el artículo.

Nota: El autor es responsable de garantizar el cumplimiento de los requisitos establecidos para las imágenes. En caso contrario, el artículo quedará en cola de espera para su publicación.

5. Prioridad de publicación

La prioridad de publicación se va a regir por los siguientes criterios:

- Por impacto.
- Por tiempo de recepción del artículo.
- Enfoque de la temática.

Si un artículo tiene una mayor puntuación en base a estos criterios este tendrá prioridad para ser publicado, los otros artículos que fueron aprobados, pero no publicados en el actual número estarán en el estatus de **espera** hasta el próximo número.

6. Política de acceso y reúso

Los artículos científicos publicados en la RIDTEC son de exclusiva propiedad de sus autores. Todas las opiniones y contenidos expresados en la revista pertenecen a sus autores, siguiendo los lineamientos del documento "**Declaración de ética de publicación**", la UTP declina de toda responsabilidad por los derechos que pudiera derivarse de la lectura, interpretación y uso del contenido de los trabajos publicados.

Los autores deben acatar el principio de libre acceso en revista científicas. Por lo tanto, todos los contenidos deben estar disponibles gratuitamente al público, con el objetivo de fomentar un intercambio de conocimiento científico-académico internacional mediante nuestra plataforma Open Journal System (OJS).

7. Correspondencia o comunicaciones

Para la correspondencia, suscripciones o envío de documentación, sírvase hacerlo a siguiente dirección:

Universidad Tecnológica de Panamá

Editorial Tecnológica

Apartado 0819-07289, El Dorado, Ciudad de Panamá, República de Panamá

Además, para una comunicación directa, usted puede escribirnos al siguiente correo electrónico revista.idtecnologico@utp.ac.pa

8. Conceptos fundamentales de interés

Esta sección tiene el objetivo de ilustrar a nuestros autores y lectores sobre conceptos fundamentales de investigación y desarrollo experimental (I+D)³, y redacción científica⁴.

La I+D comprende el trabajo creativo llevado a cabo de forma sistemática para incrementar el volumen de conocimientos, incluido el conocimiento del hombre, la cultura y la sociedad, y el uso de esos conocimientos para crear nuevas aplicaciones.

El término I+D engloba tres actividades: investigación básica, investigación aplicada y desarrollo experimental. A continuación se definen cada una de estas actividades.

- La **investigación básica** consiste en trabajos experimentales o teóricos que se emprenden principalmente para obtener nuevos conocimientos acerca de los fundamentos de los fenómenos y hechos observables, sin pensar en darles ninguna aplicación o utilización determinada.
- La **investigación aplicada** consiste también en trabajos originales realizados para adquirir nuevos conocimientos y está dirigida fundamentalmente hacia un objetivo práctico específico.
- El **desarrollo experimental** consiste en trabajos sistemáticos que aprovechan los conocimientos existentes obtenidos de la investigación y/o la experiencia práctica, y está dirigido a la producción de nuevos materiales, productos o dispositivos; a la puesta en marcha de nuevos procesos, sistemas y servicios, o a la mejora de los ya existentes.

En cuanto a la redacción científica, su característica fundamental es la claridad. El éxito de la experimentación científica es el resultado de una mente clara que aborda un problema claramente formulado y llega a unas conclusiones claramente enunciadas. Idealmente, la claridad debería caracterizar todo tipo de comunicaciones; sin embargo, cuando se dice algo por primera vez, la claridad es esencial.

La mayoría de los artículos científicos publicados en las revistas de investigación primarias se aceptan

precisamente porque aportan realmente conocimientos científicos nuevos. Por ello, debe exigirse una claridad absoluta en la redacción científica. Para una mejor comprensión entre los tipos de trabajos científicos, presentamos las siguientes definiciones:

- **Artículo científico:** informe escrito y publicado que describe resultados originales de una investigación.
- **Artículo de revisión:** no es una publicación original y su estructura es diferente a la de un artículo de investigación. Ofrece una evaluación crítica de los trabajos publicados y llegan a conclusiones importantes.
- **Ensayos cortos:** son el resultado de un examen crítico de artículos de investigación científica publicados, en donde se resaltan los trabajos más importantes o los que han brindado mayor aporte al conocimiento en una área determinada.

Los conceptos fueron extraídos de los siguientes documentos:

¹<http://www.researcherid.com/>, Thomson Reuters

²<https://www.recursoscientificos.fecyt.es/>, FECYT

³"Manual de Frascati", 2003, FECYT y Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE).

⁴"Cómo escribir y publicar trabajos científicos", 2005, Roberto Day

VIII Congreso Internacional de Ingeniería, Ciencias y Tecnología-IESTEC

8th International Engineering Science and Technology Conference

**"Ciencia, Tecnología, Sostenibilidad e Innovación:
Pilares para la recuperación económica"**

19 al 21 de octubre de 2022

Wyndham Panamá Hotel Albrook Mall



    @CongresoUTP

LLAMADO A PONENCIA

ENTREGA DE ARTÍCULOS- <http://congreso.utp.ac.pa>

ÁREAS DE INTERÉS:

- ◆ Ciencia e Ingeniería de Materiales, Ciencias Básicas y Espaciales
- ◆ Biociencias, Biotecnología, Biomedicina y Agroindustrias
- ◆ Robótica, Percepción e Inteligencia Artificial
- ◆ Energía y Ambiente
- ◆ Educación en Ingeniería y Ciencias Sociales
- ◆ Infraestructura, Construcción y Edificaciones
- ◆ Logística, Innovación y Ciencias Empresariales
- ◆ Sistemas Inteligentes y TIC

FECHAS IMPORTANTES:

- | | |
|-------------------------|---|
| ◆ 18 de julio 2022 | Último día para la subida de artículo |
| ◆ 5 de septiembre 2022 | Notificación a los autores |
| ◆ 19 de septiembre 2022 | Último día para subir la versión final del artículo |
| ◆ 30 de septiembre 2022 | Último día de registro con descuento |

Para que su ponencia sea incluida en el programa de **IESTEC-2022 (International Engineering Science and Technology Conference)**, por lo menos uno de los autores, debe estar registrado y haber pagado a más tardar el 7 de octubre de 2022.

2.º Encuentro Científico Académico (ECA 2022), UTP:





Portal de REVISTAS ACADÉMICAS UTP



Bienvenido al Portal de Revistas Académicas (Investigación, Académica, Cultural, Congresos Nacionales e internacionales) de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP).

Este sitio nace como una iniciativa del proyecto UTP-Ridda² para mostrar la producción científica e investigativa desarrollado por los docentes, investigadores y estudiantes de la UTP. Este proyecto es desarrollado por la Vicerrectoría de Investigación, Postgrado y Extensión, Editorial Universitaria y la Dirección de Comunicación Estratégica, con el apoyo de las principales autoridades de nuestra Universidad.

El objetivo de esta plataforma es visibilizar la producción científica en las revistas científicas en vías de mejorar el alcance de las publicaciones a nivel nacional e internacional a través de la integración en directorios, bases de datos, catálogos e indexaciones.

A partir del 2018 las publicaciones de los volúmenes de las revistas I+D Tecnológico, Prisma Tecnológico y la Revista de Iniciación Científica (RIC) se les asignará un DOI (Digital Object Identifier).



I+D Tecnológico

ISSN: 1680-8894
E-ISSN: 2219-6714



Prisma Tecnológico

ISSN: 2076-8133
E-ISSN: 2312-637X



Revista de Iniciación Científica

ISSN: 2412-0464
E-ISSN: 2413-6786



Revista RETOS XXI

ISSN: 2524-1125
E-ISSN: 2524-1133



El Tecnológico

ISSN: 1819-9623
E-ISSN: 1819-9623

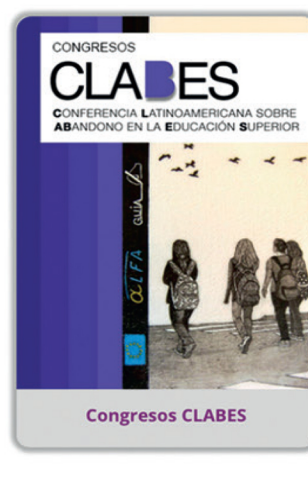


Cultural Maza

ISSN: 1018-1563
E-ISSN: 1018-1563



Memorias de Congresos UTP



Congresos CLABES

Visítenos en:

<http://www.revistas.utp.ac.pa>

No es necesario registrarse para tener acceso a los contenidos de las revistas



Universidad Tecnológica de Panamá
Campus Universitario Dr. Víctor Levi Sasso,
Edificio Administrativo
Teléfono: (507) 560-3703 | Telefax 560-3442
Correo Electrónico: editorial@utp.ac.pa
Web: www.utp.ac.pa
Apartado Postal 0819-07289 El Dorado,
Panamá, República de Panamá.