

Revista de



TECNOLÓGICO

RIDTEC | Vol. 18, N.º 1, 2022, enero – junio 2022

P - ISSN 1680-8894

E ISSN L-2219-6714

Edición semestral

Publicación regional



Revista de I+D Tecnológico: revista de investigación en la Universidad Tecnológica de Panamá. - Vol. 18, no. 1 (ene. - jun. 2022. - Panamá: Editorial Tecnológica, 2022).

v. ;27 cm.

Semestral

E ISSN L-2219-6714

P-ISSN 1680-8894

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

Mgtr. 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. Luis A. Muñoz V.
Coordinador 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:

<https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/about/submissions>

© 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 L-2219-6714

Directora de Investigación

Dra. Zoila Yadira de Castillo¹

Editor de la revista

Dr. Miguel Vargas-Lombardo²

Coeditora

Janelys Rodríguez Arjona³

Comité editorial

M.Sc. Julio Mario Daza⁴

Dr. Jesús Javier Alcantar Peña⁵

Dr. David Álvarez Martínez⁶

Dra. Elsa María Acosta Moltó⁷

Mgter. Aracelis González-Johnson⁸

Proyección internacional

Dra. Elida de Obaldía⁹

Comité científico

Dr. Christian Chapa González¹⁰

Dr. Carlos Medina¹¹

Dr. Hugo Gerardo Botasso¹²

Dra. Mairim Solis¹³

Dr. Hermógenes Fernández¹⁴

Soporte técnico y bibliometría

Ing. Danny Murillo González¹⁵

Ing. Dalys Saavedra¹⁵

Dirección de Comunicación Estratégica

Dra. Libia Batista de Muñoz¹⁶

Mgter. Danilo Toro¹⁷

Lic. Karin Guillén M.¹⁸

Afiliaciones

1. Profesora de la Facultad de Ingeniería Industrial, Dirección de Investigación, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.
2. Miembro del Sistema Nacional de Investigación (SIN), investigador y profesor catedrático de la Facultad de Sistemas Computacionales, Panamá.
3. Dirección de Investigación, 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), México.
6. Docente investigador, Universidad de los Andes, Colombia.
7. Investigador independiente, Panamá.
8. Profesora de inglés de la Facultad de Humanidades, Universidad de Panamá, Extensión Universitaria de Soná, Panamá
9. Asesora de investigación de la Vicerrectoría de Investigación, Postgrado y Extensión, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.
10. Docente investigador, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computacional, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México.
11. Profesor de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.
12. Profesor titular ordinario, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.
13. Investigadora del Departamento de Investigación y Evaluación de Tecnologías Sanitarias, Instituto Conmemorativo Gorgas de Estudios de la Salud (ICGES), Panamá.
14. Investigador del Instituto de Investigaciones Científicas y Servicios de Alta Tecnología AIP (INDICASAT), Panamá.
15. Unidad de Bibliometría e Información Científica Abierta, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.
16. Editorial Universitaria, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.
17. Dirección de Comunicación Estratégica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.
18. Diseño Gráfico, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.



*P*resentación

por Dr. Miguel Vargas-Lombardo Ph.D, MsC.

Editor en jefe, Revista de I+D Tecnológico
Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
Enero, 2022

La Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) presenta a la comunidad científica y a la sociedad la primera edición del año 2021 de la Revista de I+D Tecnológico (RIDTEC), volumen 18, número 1. Esta revista tiene el propósito de divulgar la labor de investigación científica de la UTP. Nace en 2002 como una revista abierta (OA) evaluada por pares doble ciego y con publicación semestral. RIDTEC es la principal revista panameña para la publicación de trabajos de investigación en las áreas de ciencias, ingeniería y tecnología, contribuyendo así a la divulgación del conocimiento de docentes e investigadores nacionales e internacionales.

En esta edición se abordan, en primer lugar, estudios experimentales sobre técnicas de bajo consumo energético en climas tropicales, con lo cual se muestran aspectos técnicos y estudios sobre el ahorro de energía y agua en la edificación; los avances en la aplicación de campos magnéticos como herramienta para mejorar la productividad de diferentes cultivos, como parte de las técnicas de reciente aplicación en el campo agrícola.

Otro importante tema expuesto en RIDTEC son estudios de investigación, desarrollo e innovación (I+D+I), sobre las condiciones de calidad de la leche que se produce en Panamá y lo esencial de correlacionar esta condición con los parámetros de calidad establecidos internacionalmente.

El desarrollo conceptos sobre la bioinspiración, las características comunes en los materiales biológicos, en conjunto con diseños de estructuras de pared delgada, es otro tópico expuesto en este número. Las estructuras, propiedades y anatomía de la palma de coco (cocos nucifera) son estudiadas como parte de la inspiración, siendo estas plantas parte de la vegetación de Panamá.

Se presenta una investigación sobre la ubicación y el dimensionamiento óptimo de la generación distribuida con inyección de potencia activa en sistemas de distribución radial mediante un flujo de potencia óptimo a través del algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO).

Una interesante revisión de la literatura existente relacionada con el estrés y sus fuentes generadoras en la aviación, un tema poco estudiado en Panamá despertará el interés para futuros abordajes sobre temáticas aun no abordadas.

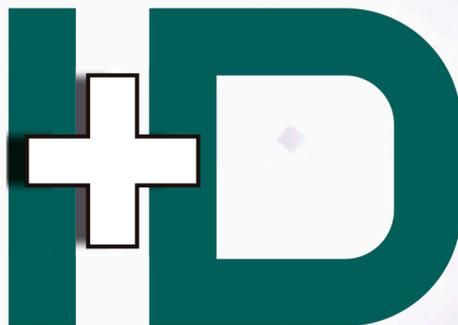
Contamos también con una importante investigación sobre la degradación térmica de ácido ascórbico en jugo de limón. Los resultados de esta indagación pueden conducir a mejorar la estabilidad del ácido ascórbico en los derivados del limón.

Uno de los artículos expone una nueva propuesta de diseños tecnológicos renovables y referencias para el diseño de plantas solares fotovoltaicas en Panamá, así como los parámetros que influyen en su producción de energía.

Presentamos a la comunidad la realización de una serie de estudios geofísicos en la comunidad de Finca 30, provincia de Bocas del Toro, noroccidente de Panamá, cuyo objetivo se focalizó en evaluar el uso combinado de los resultados obtenidos mediante la refracción sísmica (velocidad de onda P) y el análisis multicanal de ondas superficiales (velocidad de onda S) vía el cociente de Poisson para la detección de capas freáticas someras en el sitio de estudio.

Por último, RIDTEC muestra un estudio sobre la aplicación de un método de espectroscopía acústica sobre muestras líquidas, las cuales se les hace pasar una energía de excitación producidas por un barrido de ondas sonoras que van desde los 20Hz hasta los 20KHz, y luego la respuesta del sistema a dicha excitación es captada y procesada para su posterior análisis.

Como editor en principal de la Revista de I+D Tecnológico seguiré impulsando la divulgación científica con el firme propósito de reforzar la misión de la UTP de «generar conocimiento apropiado para contribuir al desarrollo sostenible y responder a los requerimientos del entorno».



Contenido

5-18

Low-consumption techniques in tropical climates for energy and water savings in buildings: A review on experimental studies

Técnicas de bajo consumo en climas tropicales para el ahorro de energía y agua en la edificación:

Una revisión de estudios experimentales

Katherine Chung-Camargo | Mariana Bencid | Dafni Mora | Miguel Chen-Austin

37-49

Diseño bioinspirado en la palma de coco de Panamá para estructuras de absorción de energía

Panama coconut palm bio-inspired design for energy absorption structures

Nacarí Marín | Estephany Reyes | Kui Wang | Noé Serrano

19-26

Magnetic fields: influence of their properties in the agricultural production process

Campos magnéticos: influencia de sus propiedades en el proceso de producción agrícola

Pablo Montero-Prado | César Almanza-Cruz

50-68

Ubicación y dimensionamiento óptimo de generación distribuida fotovoltaica en redes de distribución usando PSO

Optimal location and dimensioning of photovoltaic distributed generation in distribution networks using PSO

Alexander Águila-Téllez | Diego González | Gonzalo Gutiérrez | Leony Ortiz

27-36

Calidad y seguridad de la leche cruda de vaca producida en Panamá

Quality and safety of raw cow's milk produced in Panama

Pablo Montero-Prado

69-73

Estrés en la aviación, un problema de salud ocupacional que requiere una adecuada gestión de recursos de la tripulación: una revisión

Stress in aviation, an occupational health problem that requires proper crew resource management: a review

Reyna M. Vergara-Montenegro | Israel Ríos-Castillo

Contenido

74-81

Degradación térmica de ácido ascórbico en jugo de limón
 Thermal degradation of ascorbic acid in lemon juice
 María Antonieta Riera | Yunet Gómez-Salcedo | Rosa Córdova-Mosquera

108-116

Combinando el método de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales para la detección de niveles freáticos someros en el noroccidente del Istmo de Panamá
 Combining the seismic refraction method and multichannel analysis of surface waves for detection of shallow water-table in the northwestern Isthmus of Panama
 Alexis Mojica | Osiris Cubilla | Eduardo Silva | José Ladrón-De Guevara | Alberto Ruíz | Carlos A. Ho | Jaime Toral

82-99

Diseño de una planta solar fotovoltaica y la influencia de los datos climáticos en la producción de energía
 Design of a photovoltaic solar plant and the influence of climate data on energy production
 Jahir Reyna | Félix Henríquez | Dafni Mora

117-126

Diseño y prueba de un equipo de espectroscopia de resonancia acústica en líquidos y sus potenciales usos
 Design and testing of acoustic resonance spectroscopy equipment and its potential uses
 Juan Carlos Aranda | Eleicer Ching-Prado

100-107

Producción de pimiento (Capsicum annuum): comparación entre tipos de pimiento
 Sweet pepper (Capsicum annuum) production: comparison between types of sweet pepper
 José E. Monge-Pérez | Esteban Elizondo-Cabalseta | Michelle Loría-Coto

Indexadores



Base de datos



PKPINDEX



Repositorios



Directorios



MIAR



Low-consumption techniques in tropical climates for energy and water savings in buildings: A review on experimental studies

Técnicas de bajo consumo en climas tropicales para el ahorro de energía y agua en la edificación: Una revisión de estudios experimentales

Katherine Chung-Camargo¹ , Mariana Bencid¹ , Dafni Mora^{1,2,3} , Miguel Chen-Austin^{1,2,3*} 

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Mecánica, Grupo de Investigación Energética y Confort en Edificaciones Bioclimáticas (ECEB), Panamá

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

³ Sistema Nacional de Investigación (SNI), Panamá

katherine.chung@utp.ac.pa; mariana.bencid@utp.ac.pa; dafni.mora@utp.ac.pa; miguel.chen@utp.ac.pa

Fecha de recepción: 30 de marzo de 2022; Fecha de aprobación: 23 de junio de 2022.

***Autor de correspondencia:** Miguel Chen-Austin (miguel.chen@utp.ac.pa)

ABSTRACT. Different investigations have been developed over the years, and experimental research takes time to collect the information. Considering this, the objective of this research is to carry out a literature review of the strategies adopted by countries with tropical climates to achieve energy and water efficiency, as well as the comfort of the occupants to evaluate the performance of these techniques for each tropical climate type (i.e., tropical rainforest, tropical monsoon, tropical savanna, and subtropical). A methodology is presented using keywords and exclusion criteria for the best selection of articles. Time is saved by searching for information on low consumption strategies, types of buildings, and techniques implemented in each country. A summary of each experimental investigation is made. Results showed that it is possible to apply different techniques to the same type of building and have the savings of interest (water, energy, or comfort) without limiting it to a specific technique. Some tropical climates tend to use only one type of savings, such as comfort and others use energy and water. The experimental studies presented a relevant saving for passive design strategies in the following order: 1- 62.22% applying natural ventilation, water wall and stack flue, 2- 41% and 43% applying daylighting and glazing. 3- 35% applying wall insulation. For low consumption techniques: 1-14.31% and a 32.30% Remote Control extension device and 2-19% applying semitransparent photovoltaic glazing. This article is a resource that can be used by anyone interested in experimental studies in tropical climates.

Keywords. *Tropical climate, experimental research, low consumption techniques.*

RESUMEN. Se han desarrollado diferentes investigaciones a lo largo de los años, y la investigación experimental toma tiempo para recopilar la información. Considerando esto, el objetivo de esta investigación es realizar una revisión bibliográfica de las estrategias adoptadas por los países con climas tropicales para lograr la eficiencia energética e hídrica en edificaciones, así como el confort de los ocupantes con el fin de evaluar el desempeño de estas técnicas para cada tipo de clima tropical (es decir, selva tropical, monzón tropical, sabana tropical y subtropical). Se presenta una metodología utilizando palabras clave y criterios de exclusión para la mejor selección de los artículos. Se realiza un resumen de cada investigación experimental. Los resultados de esta investigación demostraron que es posible aplicar diferentes técnicas a un mismo tipo de edificación y tener el ahorro de interés (hídrico, energía o confort) sin limitar a una técnica específica. Algunos climas tropicales tienen una tendencia a usar solo un tipo de ahorro como confort y otros usan energía y agua. Los estudios experimentales presentaron un ahorro relevante para las estrategias de diseño pasivo en el siguiente orden: 1- 62.22% aplicando ventilación natural, muro de agua y chimenea, 2- 41% y 43% aplicando iluminación natural y acristalamiento. 3- 35% aplicando aislamiento de paredes. Para técnicas de bajo consumo: 1-14.31% y 32.30% dispositivo de extensión de Control Remoto y 2-19% aplicando acristalamiento fotovoltaico semitransparente Este artículo es un recurso que puede ser utilizado por cualquier persona interesada en estudios experimentales en clima tropical.

Palabras clave. *Clima tropical, investigación experimental, técnicas de bajo consumo.*

1. Introduction

Global warming and its effects on climate change have been a matter of deep concern over the years, leading experts to evaluate and integrate different measures to offset the repercussions of greenhouse emissions in the atmosphere. The building sector, as part of this problem, comprises over one-third of the global energy consumption and nearly 40% of total CO₂ emissions [1]. These numbers reflect the imminent need to redirect our actions towards low-consumption solutions as well as to the use of renewable energy sources with the aim to reduce the carbon footprint of the building sector and to ensure sustainable development through the entire buildings' life cycle.

Following this direction, many countries have recently included near-zero energy buildings (nZEB) and net zero energy buildings (NZEB) as part of their policies. These types of buildings operate by reducing at utmost the energy consumption of the building in a way that the final energy needs can be supplied by renewable sources [2]. Thus, the application of both passive and active strategies is crucial as the first step to achieving low energy consumption in buildings. Nevertheless, the selection of the strategies to be used is strongly connected to the necessities of each specific climatic condition.

In tropical countries, which are characterized by high temperatures and high levels of solar radiation, conventional methods are commonly used for cooling purposes, resulting in very high energy demands. Simulations and experimental research have been conducted on different low-consumption techniques in buildings in the tropics to assess the effectiveness of these strategies in reducing water and energy needs while maintaining a comfortable environment. India, Indonesia, Malaysia, Singapore, Ghana, and Trinidad and Tobago are among the tropical countries that have implemented this type of technique.

1.1. Motivation and objectives

Along with high temperatures, tropical climates often face challenges such as high levels of relative humidity and, in some cases, considerable precipitation during the year. These characteristics make it difficult for the building to provide comfortable conditions to the occupants without relying on electrical lighting and mechanical cooling systems. To address this problem, it

is important to focus the building's design on passive strategies that enhance natural ventilation, take advantage of available daylight, and reduce heat gains through the envelope. Although the implementation of these strategies reduces dependency on conventional lighting and cooling systems, it creates a high dependency on climatic conditions that tend to be stochastic. This may represent an obstacle to the correct fulfillment of the passive solutions. Thereby, applying active strategies such as efficient lighting and air conditioning systems is fundamental to complement passive strategies in the reduction of energy consumption.

On the other hand, many of the countries located within the tropical regions are classified as developing countries (e.g., Malaysia, Oman, Ghana, Trinidad and Tobago, Tanzania, among others). As a consequence, most of them have few or no relevant policies regarding NZEB or nZEB [3]. The lack of policies makes it more difficult for the countries to have a realistic benchmark for their local conditions and therefore suppresses further investigation and planning for innovative strategies that change the course of the actual building sector in hot and humid climates. As a result, there are little experimental data on techniques that have been applied to buildings in the tropics that have reported a reduction in energy and water demand and/or an increase in thermal comfort. Nevertheless, these experimental results are worth reporting in a systematized way to provide a condensed bank of references for rapid identification regarding the type of tropical climate, building type, and energy and water reduction interest.

Hence, the aim of this research is to accomplish a literature review of the strategies adopted by countries with tropical climates to achieve energy and water efficiency as well as the comfort of the occupants with the purpose of reporting the techniques employed for each type of tropical climate (i.e., tropical rainforest, tropical monsoon, and tropical savanna).

1.2. Scope and Structure

This investigation comprises the experimental data of active and passive strategies adopted by tropical climate countries to reduce energy and water consumption and achieve thermal comfort in buildings.

The structure adopted for the research starts with section 1, with the introduction of the problematics faced by the building sector and the motivation to pursue

further investigation, specifically in the tropics. The methodology is then explained in section 2 regarding the searching strategy for the data collection and the filtering process. In sections 3 and 4, results and discussions on the analyzed techniques are presented. Ultimately section 5 includes the conclusions of the investigation.

2. Materials and methods

The methodology used for this research consists primarily of collecting data related to the objectives of the investigation. For this purpose, a research strategy following the next steps were implemented: (i) keyword generation, where specific words and their most relevant synonyms were selected, (ii) use of logical operators as OR, AND to combine and connect the keywords to make the research more efficient and (iii) selection of search engines that gather relevant information on the subject.

Regarding keyword generation, the words “Energy savings,” “Water savings,” “Low-consumption solutions,” and “Life Cycle” were connected through the logical operator AND to limit words as “buildings” and “tropical OR tropics.” The resulting combinations (square 2, figure 1) were introduced into the selected

engines (i.e., scholar google, ScienceDirect, and EBSCO) for preliminary research from which, manually, articles within the scope of the investigation were selected. The metadata of these articles was then analyzed to evaluate the most common words used by researchers to refer to strategies that achieve a reduction in water and energy consumption (square 4, Figure 1). From this analysis, words such as “Passive design strategies,” “Energy efficiency,” and “Water efficiency” were selected as new keywords and combined through logical operators obtaining the final combinations shown in square 5 of Figure 1. Thus, this time, the same procedure was applied for new research, including T&F, MDPI, and Emerald as search engines.

Once the final research was concluded, a manual filtration process was again conducted to ensure that only articles regarding experimental research on tropical countries and their application of low-consumption solutions to buildings were selected for this study. These articles were then thoroughly analyzed to review all the strategies found and their reported results.

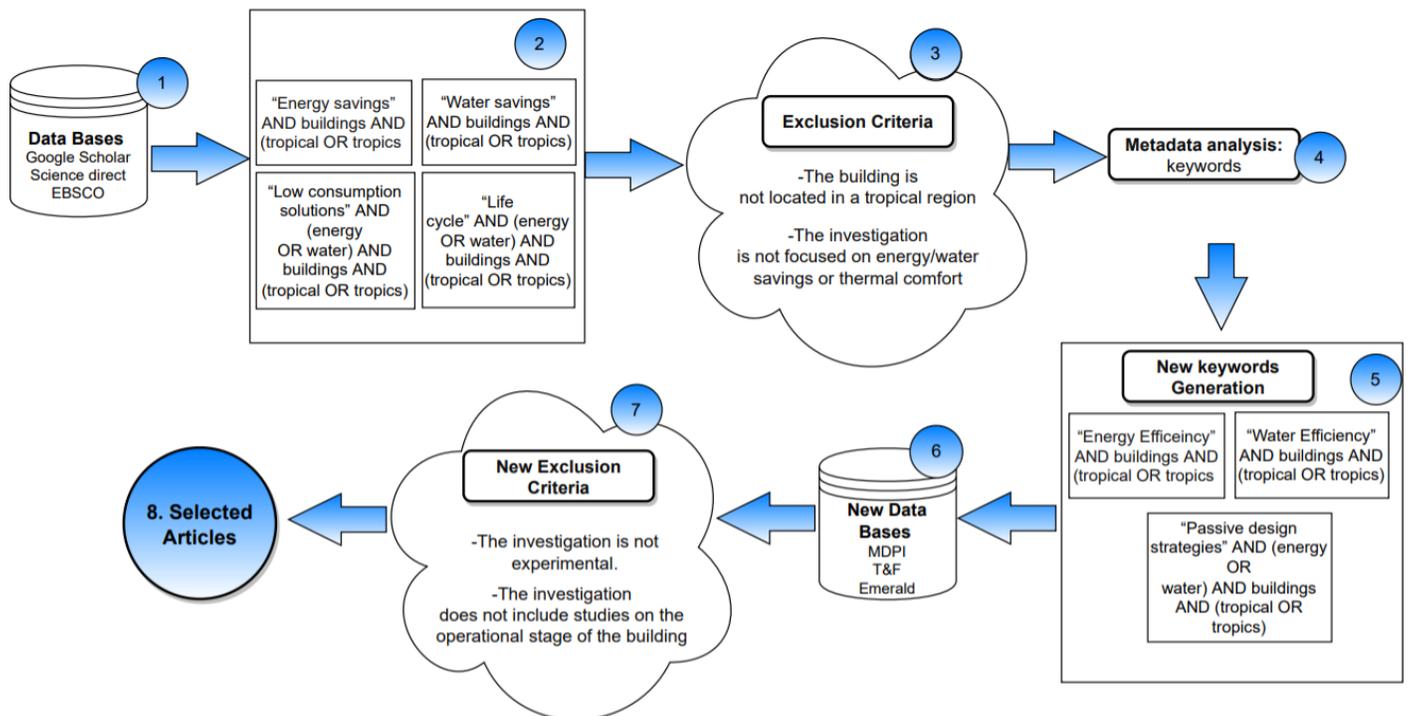


Figure 1. Search procedure for the inspection of the literature.

3. Results and discussion

The following section summarizes each selected article according to the chosen parameters. Also, Table 1 gathers the countries with a tropical climate that have applied experimental studies, type of building, and the saving strategy applied in each experimental research.

3.1. Results of Energy Savings

3.1.1. Passive design strategies

Different passive strategies have been studied and implemented to buildings in the tropics to address high energy consumption and thermal comfort issues. Among these, passive cooling is a widely studied technique that has been applied to new buildings [4-7], atriums [8], as well as to already existing buildings as a retrofit [9]. Passive cooling can be achieved through different strategies such as enhancing natural ventilation with the aim of reducing dependency on Air-conditioning systems (ACS). One of the most basic strategies used to accomplish successful natural ventilation is to orientate the building in a way that ensures comfortable airflow throughout the day. This technique has been adopted by the ENERPOS building, a net zero energy building (NZEB) located in the Sant Pierre Campus at the University of Reunion, where the main facades are north and south oriented, that being perpendicular to the thermal breezes, optimizing this way the natural ventilation of the building [4].

Besides building orientation, windows, and openings play an important role in natural ventilation. A prototype of a residential zero energy building in Muscat, Oman, named SQU eco-house, implemented in its design long vertical windows with lower and upper openings in parallel walls that create a wind pressure differential and allows the air to flow from the lower openings to the upper ones, ensuring natural ventilation at daytime and nighttime [5].

Other strategies are also commonly implemented, such as adjustable louvers that control the direction of air flow. An example of this is the case of an energy-efficient university building located in Singapore that opted for an open design concept with louvered sunscreens that allow free flow of air in the canteen area [6]. A similar strategy was employed by the ENERPOS building in which cross natural ventilation was provided through manually

adjustable louvers with a window to wall ratio (WWR) of 30% on parallel sides of the classrooms, avoiding the necessity for ACS. This passive cooling technique proved to be efficient at providing temperature comfort to students as the building scored 5.73 points in the BUS (building use studies) survey, that is, better than the average score of buildings surveyed [4]. Cross ventilation also proved to be effective for residential buildings such as the Golconde Dormitories in South India, where a north corridor was built with adjustable cement louvers. The corridor blocks direct solar radiation and rain and acts as a buffer zone, managing to lower inside room temperature by 0.5°C regarding the corridor's temperature. The temperature difference provides air flow and thus ventilates the area between the corridor and the adjacent room [7].

Furthermore, additional passive cooling techniques were studied at Golconde Dormitories, such as a ventilated double roof made of reinforced concrete (RCC) covered with a precast concrete shell that forms a ventilated air gap of approximately 10-30cm. Monitoring showed that the ventilated double roof managed to lower temperature damping by 18°C, maintaining thermal comfort without the need for mechanical ventilation. Additional to the ventilated roof, the Golconde Dormitories count with two gardens located at each North and South facades, respectively. The purpose of these gardens, along with preventing hot air from entering the building, is to create a temperature difference that allows air to flow constantly through the building and the semi-basement, making this latter area the coolest area in the building, maintaining a stable surface temperature between 30-34°C [7].

Monitoring procedure was also conducted to a low energy office building, KeTHA, located in Malaysia. The aim of the study was to investigate the effects of natural ventilation and other passive cooling techniques (i.e., stack flue and water wall evaporative cooling) on the thermal performance of the building's atrium. The atrium was built with four large windows and doors that supply fresh airflow already precooled by the trees on the street. It also counts with a water wall that works as an evaporative cooling system since the airflow passes through the humid surface of the wall and some of the water turns into vapor, in this way, the continuous flow of the water extracts heat from the air. Another feature of the atrium is the stack flue installed at the top of the roof

that supplies a pressure difference between inside and outside air that naturally drives the cool fresh air from outside into the building. Results showed that a high percentage of thermal comfort was achieved (62.22%) when the water wall remained open and the stack flue semi-open, providing cross ventilation in different levels. These configurations of the openings resulted in an average temperature of 27.12°C during working hours [8].

Similar to the stack flue, four solar chimneys were installed on the roof of an already existing university building in Singapore as part of a set of retrofits. The mechanism of this chimney is to expel hot air out of the building through the buoyancy effect while permitting the entrance of outdoor ambient air. Energy savings due to the operation of the chimneys accounted for 832kWh annually [9].

Moreover, among the passive cooling techniques, thermal insulation has been implemented in buildings in the tropics with the purpose of reducing heat gains through the envelope. It is the case of the ENERPOS building in which a 10cm layer of polystyrene was installed over the roof as an insulation material [4]. Along with this building, other studies on thermal insulation have been conducted in the tropics such as an experimental monitoring at Trinidad and Tobago evaluating the energy performance of three equal-sized small prototypes that were equipped with different types of wall and roof materials, making different models to be tested. The study was conducted in two phases, phase 1 for the building envelope insulation and phase 2 for the roof system insulation. In Phase 1, three models were constructed with (A): 100mm concrete block envelope and red clay tile roof, (B): 100mm clay block envelope with corrugated standing steam ceiling, and (C): 150mm concrete block envelope with galvanized iron roof system. These three models were thermally insulated with 38.1mm of fiber glass on the envelope and roof. From this study, it was found that model B showed the lowest energy consumption in the peak hours (an average of 0.3420kWh from 10:00am to 4:00pm) and recorded the lowest indoor temperature and relative humidity (60%) regarding the other models, proving to be the most efficient. Phase 2 tested five different models, in which model #2 with corrugated galvanized sheeting and fiber glass insulation had the lowest energy consumption when compared to the other models; a recording consumption of 1.74kWh through the daytime and 0.754kWh during

nighttime [10]. Moreover, in Trinidad and Tobago, another study was conducted using coconut fiber as insulating material. In this case, two identical small-scale models were tested, models 1 and 2 were constructed with concrete and clay blocks, respectively. To correctly assess the performance of the materials, both models were first tested without insulation to develop a benchmark. Then, the models were tested using the coconut fiber and fiberglass insulation under the local climatic conditions. For model 1, coconut fiber insulation proved being the most efficient material, maintaining an average temperature of 27.8°C with a temperature difference of 5.6°C regarding outside temperature. On the other hand, the most efficient material for model 2 was the fiberglass insulation since it managed to maintain relative humidity values inside the acceptable range (40-70%) for the longest number of hours (9:00-21:00). Related to energy efficiency, the model with fiber glass insulation showed the lowest energy consumption, reducing up to more than 35% when compared to the no-insulation model. [11].

Vegetation is also part of the passive cooling techniques studied in the tropics, it is commonly applied to buildings as a part of their envelope (i.e, walls and roofs) or as a shading strategy to protect the building from solar exposure. As an example of this, the QSU building in Oman included, along with date palm wood screens and vertical canvas strips, climber plants that could grow up to the height of one floor, creating a bio-wall system that provided shading through the year [5]. Moreover, a case of a study of two similar houses (with and without vegetation) was conducted in Malaysia with the purpose of evaluating the thermal performance of the shading. According to the measured data, the temperature difference between the vegetated and non-vegetated building was of 5.3°C and 2.8°C for indoor and outdoor temperatures, respectively; concluding that the outdoor and indoor temperatures can be significantly reduced by implementing vegetation as a shading strategy [12].

Vegetation can also be applied to already existing buildings as a retrofit technique, that is the case of the NZEB in Singapore that installed three different types of vertical and roof green systems (panel, planter and cage type) in order to reduce heat transmissions. Results of a year-round monitoring showed that the most efficient type of vegetation was the planter type, achieving an annual saving of 5.72kWh/m². As for the total energy savings of the three types of greenery, including the green

roof, the building registered 82.9kWh per year. For further cooling in the building, the low emissivity glazing was coated with UV film to reduce solar heat gains. The glazing retrofits achieved annual energy savings of 1,250kWh [9].

Additionally, University of Sebelas Maret in Indonesia carried out a field study testing three different types of green roofs named A, made with concrete, B, made with corrugated zinc, and C made with the same criteria as B with the difference that this last one was not covered with vegetation. For this study, a significant reduction on indoor temperature was found when comparing corrugated zinc roof with plants and without plants (types B and C). The indoor temperature difference between both was of 25.6°C at the peak hour (12:00 pm). Also, the vegetated zinc roof reached a maximum indoor temperature of 27.7°C, while maintaining the indoor temperature within the range of 24.8°C to 32.4°C through the rainy season. On the other hand, the heat flow of concrete roof with plants was the lowest of the three types, reaching its peak at 5:00pm at a rate of 10.5W/m², more than three times less than the corrugated zinc with plants [13].

Likewise, a study on living walls (LW) was conducted in Naresuan University, Thailand with three experimental boxes of which Box 1 was a reference box with no vegetation, and Box 2 and 3 were covered with 6mm of thick felt and 0.10x0.1 m pockets for plants. In this study, twelve different plant species with different leave sizes (small, medium, and large) were installed on the LWs. When compared to the reference box, LWs showed a lower temperature during the daytime but a higher temperature during the nighttime. Furthermore, LWs accommodated with medium-sized leaves proved to be more efficient at reducing temperature, managing to reduce the peak indoor temperature from 50.6°C to 44.9°C. The study concluded, through a correlation analysis, that the leaf area index (LAI) is a key factor in the achieving cooling efficiency for LWs [14].

In addition to the strategies previously mentioned, daylighting is a passive approach that seeks to take advantage of natural light in a way that minimizes electricity consumption. Daylighting was achieved in the ENERPOS building by adequate orientation and glazing. In this way, total artificial lighting was reduced and even avoided in two of the classrooms [4]. As another example, the QSU eco-house at Oman enabled sunlight by installing clear glass windows and glass doors with

adjustable drapes that were distributed in all zones [5]. Glass doors were also installed, along skylights in the energy efficient NIE building in Singapore, to enhance daylighting. The linear design of the building provided a floor depth of less than 12.2 meters from walls or windows, which also maximized natural light inside the lecture rooms and staff offices [6].

In order to incorporate daylighting as a retrofit, the ZEB building in Singapore installed mirror ducts and light shelves with reflective materials to redirect zenith light into deeper spaces of the building, along with light pipes in which mirrors would rotate with the sun's trajectory. The annual energy savings for the ducts, light shelves and light pipes was of 50kWh, 180kWh and 550kWh respectively [9].

A full-scale study conducted in Malaysia evaluated the performance of an innovative roofing system (IRS) that integrates both daylight and passive cooling techniques. In this study, top-lighting system and skylight with double polycarbonate were implemented into an attic in order to provide natural light. The chosen passive technique for cooling was reflective and radiative cooling. The IRS showed the lowest indoor temperatures relative to outdoor temperatures when compared to other systems, managing to reduce indoor temperature up to 2.01°C under daylight conditions [15].

In Tanzania, daylighting was studied through a field experiment using building integrated semi-transparent photovoltaic modules on a classroom at the Nelson Mandela Institute of Science and Technology. The purpose of this study was to measure air temperature, relative humidity, and solar irradiance under weather conditions as clear sky, cloudy sky, and normal sky. Measurement was carried from May to August 2019 in an hour range from 8:00 to 18:00hr. The results of this study showed a significant dependency of the PV module efficiency on solar irradiance, achieving the highest electrical efficiency of 8.89% at 1100W/m². The system also proved to provide visual comfort during the mentioned hours and thus saving up to 19% of the energy of the room [16].

Daylight plays an important role on visual appraisal as it contributes to the occupant's comfort and reduction of energy consumption. A survey was carried in two different green buildings in Malaysia, i.e., the Energy Commission Building (ECB) and the Public Works Department (PWD), with the purpose of evaluating the performance of daylighting techniques on the visual

appraisal of the occupants. Results showed that more than 80% of users in ECB and 65% of users in PWD preferred having daylight in their working spaces. Nevertheless, 21% and 24% of users of ECB and PWD respectively, stated to be dissatisfied with task brightness when working in the computers, and 28% and 25% when doing paperwork. On the other hand, daylighting techniques applied to both buildings, such as WWR adjustments, glazing, ceiling, wall and floor reflectance and adequately oriented openings, showed a reduction in energy consumption of 41% for ECB and 53% for PWD [17].

To address the problem of an excess of brightness and heat gains from the sunlight, shading devices are commonly used. The QSU eco-house in Oman implemented a double shell system to obstruct solar radiation and to prevent its thermal load from reaching indoor spaces. A shell was also applied to the building in a way that creates a 60cm cavity and provides shading to the roof [5].

3.1.2. Active strategies

Following the hierarchical design model for NZEBs proposed by Wells [18], once all the passive techniques have been fully considered for the building's design, the next step is to evaluate the implementation of energy-efficient systems. These are called active strategies and they include, but are not limited to, ACS, heat pumps, boilers, and electric lighting.

Countries with tropical climate are characterized by a high cooling demand due to the high temperatures and levels of irradiance. This has led to different studies on how to make mechanical systems such as air-conditioning more efficient in terms of energy consumption and reduction of GHG emissions. This is the case of a research conducted in Malaysia where a solar-assisted air conditioning system is proposed. The purpose of this cooling system is to convert the energy captured from the solar rays into electricity that powers the AC. The results indicated that the coefficient of performance (COP) for the solar-assisted AC ranged from 2.98 to 4.45 on the three days it was measured, proving to be energy efficient. When compared to an inverter AC unit, solar assisted AC proved to have considerably lower values of power usage on account of the PV panel [19].

Following this line of studies, in Indonesia, a remote-control extension device was proposed to reduce the

energy consumption of already installed cooling units without recurring to expensive built-in automation. The purpose of the system is to detect human presence through a passive infrared sensor (PIR), activated by a push-button mechanism. The device is controlled by a Mini Arduino that activates a solenoid when the PIR detects heat energy from humans. The purpose of the solenoid is to produce an electromagnetic field that pushes the remote button and turns on the AC unit. The device can be programmed to turn off the machine after a period of undetected human presence. The study was conducted on a standard 1 hp AC unit and when compared to the performance of a built-in automated AC, the proposed system was able to reduce energy consumption a 14.31% and a 32.30% regarding standard AC without the extension device [20].

Other high efficiency systems have been implemented in nZEBs and NZEBs in the tropics. Such is the case of the National Institute of Education (NIE) in Singapore. This building uses a variable air volume system (VAV) which has proven to be effective in reducing energy consumption in tropical climates [21]. Along with the VAV, the fans installed through the building are controlled manually by variable speed drive (VSD) avoiding the fans to operate at full speed unless needed. Also, the building uses chillers with 0.6kW/ton of efficiency. In relation to electricity systems, the NIE is integrated with motion detectors in toilets, parking lots and internal corridors to limit the time the lights are switched on. Common areas are controlled by Integrated Building Management System (IBMS) and monitored throughout the year to measure energy consumption and to support decision-making when improvement is needed. The cooling and electrical efficiency measures mentioned above have significantly decreased energy consumption and cost of the NIE building regarding the original design [6].

The university ZEB building in Singapore considered the application of active strategies as well, in this case as retrofits. The main techniques were focused in making mechanical ventilation more efficient using variable speed fans, a single coil twin fan system, displacement ventilation system, under-floor cooling and personalized ventilation. Variable speed fan system (VSF) is designed to detect the levels of carbon dioxide (CO₂) in the room and adjust the speed of the fan according to the number of occupants. As a result, VSF showed to save 64,000kWh of energy annually. Single Coil Twin Fan

System is properly an invention of Singapore and consist of the separation of fresh and recirculated air inside the fan in order to reduce the amount of airflow that needs to be cooled, this system led to energy savings of 37,189.6kWh per year. Another technique used by the building is the displacement ventilation (DV) which can supply at low speed, and thus, reducing energy load. DV along with personalized ventilation (PV), which consists of desk fans (manually adjusted by the user), proved to save an annual amount of 3,410kWh [9].

Electrical retrofits for the Singapore's ZEB included replacing lights with LED bulbs equipped with a sensor grid to measure occupancy and consequently adjust lighting levels. Task light were also installed in personal desks to promote manual control of light according to personal preference. These electrical retrofits represented more than 40% of energy savings, with a total of 74,623kWh per year. Altogether, the combination of both passive and active strategies implemented as retrofit managed to reduce the building energy demand up to 183MWh. This value results low enough for the building to compensate that demand through renewable solar energy [9]. LED lightbulbs were also the selected lighting system for the QSU house in Oman since it proved to reduce the lighting load of the house from 4-7W/m² for conventional fluorescent lamps to 1.6-2.7W/m² using LEDs [5].

3.1.3. Occupant's behavior

In addition to passive and active strategies, it has been stated by different authors [22], [23] that occupant's practices have an important influence on the energy consumption of buildings. Consequently, researchers as Ahadzie [24] and Ohueri [25] have studied how can occupant's behavior impact on the energy efficiency of buildings in the tropical region. Ahadzie conducted a correlational research based on surveys and questionnaires to identify occupant's practices that lead to efficient use of energy regarding ACS. In this study, 172 users of three major institutional buildings in Ghana were surveyed through a questionnaire for a hypothesis-testing approach on the relationship between the efficient use of air conditioners (EUAC) and four behavioral attitudes (i.e switching off the AC when leaving the room, opening windows for natural ventilation, switching on fans as an alternative for ACs, and the use of light or heavy clothes). Results showed that all

behaviors have a positive impact on achieving EUAC. Nevertheless, the practice with more relation to it, with a coefficient path of 0.527, is switching on fans as an alternative to AC, followed by opening windows for natural ventilation (0.351), wearing light or heavy clothes (0.174) and switching off ACs when leaving the room (0.146) [24].

On this subject, Ohueri conducted a mixed quantitative and qualitative study which consisted of surveying 53 green building's occupants in Malaysia in order to determine energy efficient practices for green building occupants to reduce their consumed energy. The purpose of the questionnaires was to investigate how can occupants adjust heating and cooling units on their workspace and how many occupants apply this and other specific techniques, such as dressing to manage comfort, obey organizational polices, opt for natural light when possible, and turn off appliances when leaving the office to achieve energy efficiency in the building. The data collected from the questionnaires was then triangled with the results of an interview made to five experts with the purpose of investigating the influence of the occupant's behavior practices on the energy consumption in the building. The energy efficiency (EE) practices developed for occupants consisted in implementing and evaluating an action plan by individuals who are most likely to achieve energy conservation, monitor and control energy consumption through building energy monitor and advance sensor control systems and provide occupants with all the necessary information about EE practices including regular training, workshops and incentives since the experts concluded that the first obstacle to achieve energy efficiency in green buildings is the lack of information and training given to the occupants on how to use the sustainable features integrated in the building [25].

3.1.4. Water savings

Water is a vital natural resource for the survival of species. Nevertheless, factor such as human intervention, climate change, population growth, etc., threaten the abundance of water available for consumption [26]. This has led to research on how to reduce water demand in different sectors, including construction and building sectors. One of the most common strategies to minimize

water consumption in buildings is to recycle water from bathroom sinks and shower. This is the case of a Positive Energy House (PEH) in Queensland, Australia, which manages to recycle 197 liters of water per day and use it for flushing and gardening purposes. This PEH also replaced conventional dishwashers and washing machines for water-efficient ones. These are usually equipped with sensors and controllers in a way that the quantity of the water used and/or the washing cycle duration can be adjusted according to the numbers of

dishes or the washing load. Applying the mentioned techniques, the housed managed to achieve an energy reduction of 220Wh/day on sewage treatment and reticulation of water [27]. Similar to the PEH, the ZEB in Singapore also implemented water-saving strategies such as efficient water systems, which were monitored through water sub-meters, achieving a total amount of 3,620,000 liters of water per year [9].

Table 1. Tropical climate countries with experience in experimental studies

Country	Year	Climate type	Type of building	Life cycle phase	Savings interest	Techniques studied	Details of Savings
France	2012 [4]	Aw: Tropical Savanna	University Building	Operation	Energy and Comfort	-Roof insulation -Vegetation surroundings -Natural ventilation -Building orientation -High performance ceiling fans -Solar shading -Efficient lighting and ACS	-
Ghana	2020 [24]	Aw: Tropical Savanna	Office buildings	Operation	Energy	Occupant's behavior	-
India	2017 [7]		Residential building	Operation	Comfort	-Building orientation -Natural ventilation	-
Indonesia	2019 [20]	Af: tropical rainforest		Operation	Energy	-Remote Control extension device	14.31% and a 32.30% regarding standard AC without the extension device
	2020 [13]		Residential Building		Comfort	-Green Roof	-
Malaysia	2014 [15]	Af: tropical rainforest	University Building	Operation	Comfort	-Daylighting	-
	2015 [8]		Office Building		Comfort	-Natural Ventilation -Water Wall -Stack flue	62.22% Thermal comfort
	2017 [19]				Energy	-Solar assisted AC	-
	2017 [17]				Comfort	-Daylighting -Glazing	41% for ECB and 53% for PWD
	2018				Energy	Occupant's behavior	-

	[25]						
	2019 [12]		Residential building		Comfort	-Vegetation Shading	-
Omán	2019 [5]	Bwh tropical and subtropical		Operation	Energy	-Water irrigation -form geometry and natural vent -envelope and shading	-
Singapore	2006 [6]	Af: tropical rainforest	University Building	Operation and Maintenance	Energy	-Daylighting -Natural ventilation -IBMS -Efficient Maintenance Practice	-
	2017 [28]			Energy and Water	-Shading -Low WWR -Low-e glazing -BIPV -Heat and sun pipes -LED lights - Water Efficiency Labelling Scheme	-	
	2018 [9]			Energy and Water	-Green walls and roofs -low-emissivity glass -solar film coating -Shading devices - solar assisted natural ventilation -Energy-efficient Air conditioning and mechanical ventilation -Energy-efficient Lighting -Intelligent BMS (Building management system) -low-emissivity glass -solar film coating -Shading devices - solar assisted natural ventilation -Energy-efficient Air conditioning and mechanical ventilation -Energy-efficient	832kWh chimneys 50kWh, 180kWh and 550kWh respectively ducts and lights 1,250kWh glazing retrofits 64,000kWh Variable speed fan 37,189.6kWh Single coil twin fan 3,410kWh Displacement ventilation Total: passive and active up to 183MWh 3,620,000 liters of water	

						Lighting -Intelligent BMS (Building management system)	
	2019 [29]		Various	Maintenance	-	Green walls	-
Tanzania	2019 [16]	Aw: Tropical Savanna	Institutional Building	Operation	Energy	-Semi-Transparent Photovoltaic Glazing	19% energy
Thailand	2019 [14]	Aw: Tropical Savanna	University Building	Operation	Comfort	-Living walls	-
Trinidad and Tobago	2019 [10]	Am: tropical monsoon	University building	Operation	Energy	-Insulated building envelope and roof system insulation	1.74kWh daytime and 0.754kWh nighttime
	2019 [11]					Wall insulation	35% energy

3.2. Discussion on saving interest and building type according to climate type.

First, a classification of the type of climate has been implemented according to the Köppen climate classification. Af, Aw, and Bwh are the common classification presented in a tropical climate with experimental research experience.

Climate classification is a reference to compare with other countries their experience applying energy-saving, experience, and type of building

in which their experiments were realized. In this sentence, Indonesia, Malaysia, Singapore can be compared. The same applies to France, Ghana, Tanzania, and Thailand. Trinidad and Tobago, Oman, and India presented different classifications which could not be compared.

The major experimental experience has been in Af: tropical rainforest; 12 research has been presented. Three saving strategies were presented in this type of climate.

For office building, experimental research applied energy-saving strategies [19], [25] and comfort assuring strategies [8], [17]. In the case of university, different saving strategies for comfort [15], energy [6], energy and water [9], [28], being University building the only type of building applying two saving strategies together.

Residential buildings showed comfort assuring strategies [12], [13].

According to tropical climate Am: tropical monsoon, two experimental research in university buildings was implemented, both focusing on energy saving [10], [11]. Aw: tropical Savanna applied energy-saving strategies Institutional Building [16] and office [24]. The comfort assuring strategies in this type of climate was applied only in university [14].

Finally, the Bwh: tropical and subtropical presented studies in energy-saving strategies [5].

The comfort assuring strategies are the most common in Af climate. In the case of Am, Aw, and Bwh, they implement energy-saving strategies, as is presented in Figure 2.

3.3. Discussion on saving interest and techniques studies according to building type.

The saving strategies for low consumption have been classified as comfort, energy, and water, for the analysis of this research.

For residential buildings to have comfort savings, even though it is the same type of building, different techniques were applied as a green roof [13], vegetation shading [12], building orientation, and natural ventilation [7]. In the case of university a

daylighting [15] and living walls [14] were used to get comfort savings.

Office building used solar-assisted AC [19], daylighting, and glazing [17], and for occupant behavior [24], [25] proved to use the same technique to reduce the energy consumption.

It appears that energy and comfort [4] or energy and water [9], [28], the combination of the two saving strategies, were only present in University buildings.

According to saving interest (energy, comfort, and water), this research proved that it is possible to apply different techniques to the same type of building and have the saving in which is the interest.

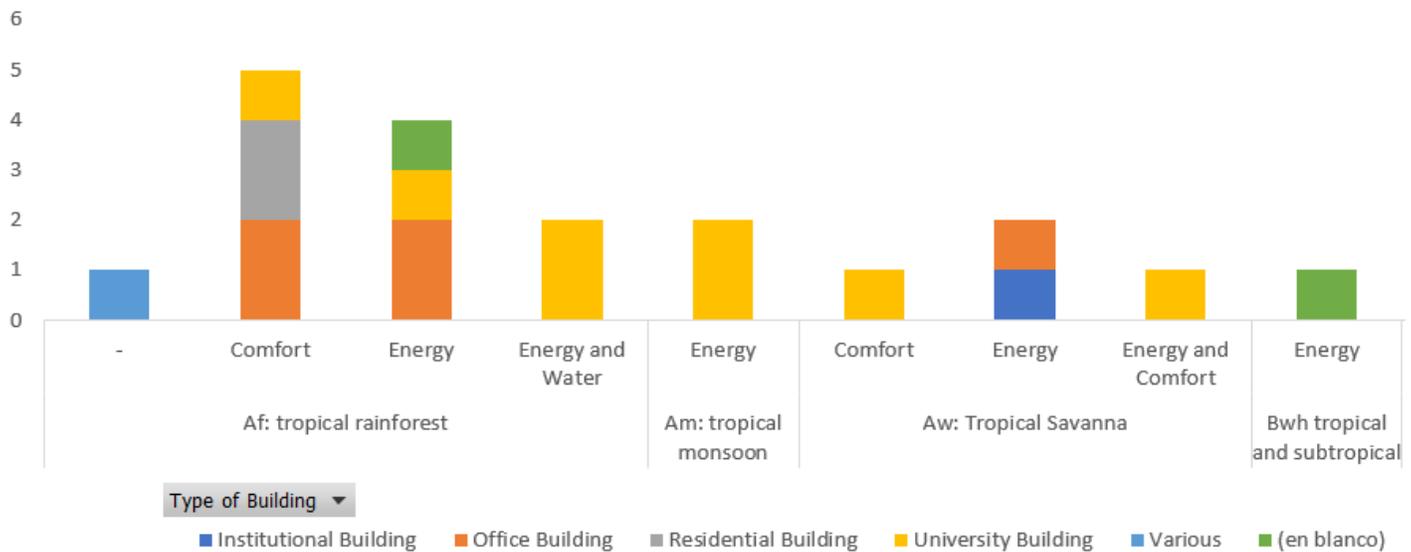


Figure 2. Saving interest and building type according to climate type.

4. Conclusions

Experimental studies are important to validate the information that has been studied. This article gathers the tropical climate countries with experimental experience in buildings. The different techniques applied in tropical climates give a better understanding of the type of building and saving strategies. The advantage of this article is to have in one place the necessary information to compare or to use in future works.

The energy savings values were analyzed, and passive solutions strategies presented the highest percentage of savings in the experimental studies that reported results.

The impact in the scientific community is a resource that can be used for any person interested in experimental studies in a tropical climate, which saves time on looking for the information for low consumption strategies, type of building, and techniques implemented in each country.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the Technological University of Panama and the Faculty of Mechanical

Engineering for their collaboration, together with the Research Group ECEB (<https://eceb.utp.ac.pa/>). This research was funded by Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) <https://www.senacyt.gob.pa/>, within the projects FIED19-R2-005, together with the Sistema Nacional de Investigación (SNI).

CONFLICTS OF INTEREST

The authors would declare no conflict of interests.

AUTHOR CONTRIBUTIONS AND APPROVAL

Introduction, figures and writing of most of the manuscript by K.C. and M.B. Original concept, formal analysis, and editing by K.C. and M.B. Methodology by K.C. and M.C.A. Supervision and funding by M.C.A. and D.M.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

REFERENCES

- [1] “IEA – International Energy Agency.” <https://www.iea.org/> (accessed Feb. 12, 2022).
- [2] P. Torcellini, S. Pless, M. Deru, and D. Crawley, “Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition,” *ACEEE Summer Study Pacific Grove*, p. 15, 2006.
- [3] W. Feng *et al.*, “A review of net zero energy buildings in hot and humid climates: Experience learned from 34 case study buildings,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 114, p. 109303, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109303.
- [4] A. Lenoir, G. Baird, and F. Garde, “Post-occupancy evaluation and experimental feedback of a net zero-energy building in a tropical climate,” *Archit. Sci. Rev.*, vol. 55, no. 3, pp. 156–168, 2012, doi: 10.1080/00038628.2012.702449.
- [5] S. N. Al-Saadi and A. K. Shaaban, “Zero energy building (ZEB) in a cooling dominated climate of Oman: Design and energy performance analysis,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 112, no. February, pp. 299–316, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.05.049.
- [6] S. H. Lek and Z. Min, “Energy efficiency for tropical campus,” *ASHRAE J.*, vol. 48, no. 5, pp. 48–53, 2006.
- [7] M. Doctor-Pingel, H. Lavocat, and N. Bhavaraju, “Performance of naturally ventilated buildings in a warm-humid climate: a case study of Golconde Dormitories, South India,” *Archit. Sci. Rev.*, vol. 60, no. 3, pp. 205–214, 2017, doi: 10.1080/00038628.2017.1300133.
- [8] L. Moosavi, N. Mahyuddin, and N. Ghafar, “Atrium cooling performance in a low energy office building in the Tropics, a field study,” *Build. Environ.*, vol. 94, no. P1, pp. 384–394, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.06.020.
- [9] X. Sun, Z. Gou, and S. S. Y. Lau, “Cost-effectiveness of active and passive design strategies for existing building retrofits in tropical climate: Case study of a zero energy building,” *J. Clean. Prod.*, vol. 183, pp. 35–45, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.137.
- [10] M. Abrahams and I. Ayoola, “Assessing residential building energy efficiency in the Caribbean environment: A case study of Trinidad and Tobago,” *West Indian J. Eng.*, vol. 41, no. 2, pp. 31–42, 2019.
- [11] J. Iwaro and A. Mwashia, “Effects of Using Coconut Fiber-Insulated Masonry Walls to Achieve Energy Efficiency and Thermal Comfort in Residential Dwellings,” *J. Archit. Eng.*, vol. 25, no. 1, p. 04019001, 2019, doi: 10.1061/(asce)ae.1943-5568.0000341.
- [12] T. S. Mari, S. Kuppasamy, S. Gunasagaran, S. Srirangam, and F. L. Ang, “Natural Brise Soleil: The Effects of Vegetation Shading on Thermal Environment of Residential Buildings in Hot and Humid Tropics,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 268, no. 1, pp. 0–7, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/268/1/012013.
- [13] S. Yuliani, G. Hardiman, E. Setyowati, W. Setyaningsih, and Y. Winarto, “Thermal behaviour of concrete and corrugated zinc green roofs on low-rise housing in the humid tropics,” *Archit. Sci. Rev.*, no. April, 2020, doi: 10.1080/00038628.2020.1751054.
- [14] S. Charoenkit, S. Yiemwattana, N. Rachapradit, S. Laywisadkul, N. Navapan, and T. Changnawa, “Thermal performance of living walls in thailand,” *Proc. Annu. Int. Conf. Archit. Civ. Eng.*, no. Ace, pp. 272–277, 2019, doi: 10.5176/2301-394X_ACE19.555.
- [15] K. M. Al-Obaidi, M. Ismail, and A. M. Abdul Rahman, “Design and performance of a novel innovative roofing system for tropical landed houses,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 85, pp. 488–504, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.05.101.
- [16] B. Joseph, B. Kichonge, and T. Pogrebnyaya, “Semi-Transparent Building Integrated Photovoltaic Solar Glazing: Investigations of Electrical and Optical Performances for Window Applications in Tropical Region,” *J. Energy*, vol. 2019, pp. 1–10, 2019, doi: 10.1155/2019/6096481.
- [17] G. H. Lim, M. B. Hirning, N. Keumala, and N. A. Ghafar, “Daylight performance and users’ visual appraisal for green building offices in Malaysia,” *Energy Build.*, vol. 141, pp. 175–185, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.02.028.
- [18] L. Wells, B. Rismanchi, and L. Aye, “A review of Net Zero Energy Buildings with reflections on the Australian context,” *Energy Build.*, vol. 158, pp. 616–628, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.10.055.
- [19] M. A. C. Munaaim, K. M. Al-Obaidi, and M. Azizul Abd Rahim, “Performance comparison of solar assisted and inverter air conditioning systems in Malaysia,” *J. Des. Built Environ.*, vol. 17, pp. 53–61, 2017, doi: 10.22452/jdbe.sp2017no1.5.
- [20] R. Control, E. Device, F. O. R. Reducing, A. I. R. Conditioner, and E. Consumption, “REMOTE CONTROL EXTENSION DEVICE FOR REDUCING AIR CONDITIONER ENERGY CONSUMPTION,” vol. 6, pp. 329–335, 2019.
- [21] O. Alvarez, M. Sanjuan, F. Amaya, and A. Bula, “VAV System Operating in an Educational Building Under Tropical Conditions: Energy Analysis.” Jul. 2013, doi: 10.1115/ES2013-18146.
- [22] T. S. Larsen *et al.*, “Occupants Influence on the Energy Consumption of Danish Domestic Buildings,” p. 77, 2010.
- [23] O. T. Masoso and L. J. Grobler, “The dark side of occupants’ behaviour on building energy use,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 2, pp. 173–177, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.08.009.
- [24] D. K. Ahadzie, R. Opoku, S. N. Opoku Ware, and H. Mensah, “Analysis of occupant behaviour in the use of air-conditioners in public buildings in developing countries: evidence from Ghana,” *Int. J. Build. Pathol. Adapt.*, no. July, 2020, doi: 10.1108/IJBPA-01-2020-0001.
- [25] C. C. Ohueri, W. I. Enegbuma, and R. Kenley, “Energy efficiency practices for Malaysian green office building

- occupants,” *Built Environ. Proj. Asset Manag.*, vol. 8, no. 2, pp. 134–146, 2018, doi: 10.1108/BEPAM-10-2017-0091.
- [26] A. Bonoli, E. Di Fusco, S. Zanni, I. Lauriola, V. Ciriello, and V. Di Federico, “Green smart technology for water (GST4Water): Life cycle analysis of urban water consumption,” *Water (Switzerland)*, vol. 11, no. 2, pp. 1–12, 2019, doi: 10.3390/w11020389.
- [27] W. Miller and L. Buys, “Anatomy of a sub-tropical Positive Energy Home (PEH),” *Sol. Energy*, vol. 86, no. 1, pp. 231–241, 2012, doi: 10.1016/j.solener.2011.09.028.
- [28] S. Babu, A. Lamano, and P. Pawar, “Sustainability assessment of a laboratory building: Case study of highest rated laboratory building in Singapore using Green Mark rating system,” *Energy Procedia*, vol. 122, no. September, pp. 751–756, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.391.
- [29] M. Y. L. Chew, S. Conejos, and F. H. Bin Azril, “Design for maintainability of high-rise vertical green facades,” *Build. Res. Inf.*, vol. 47, no. 4, pp. 453–467, 2019, doi: 10.1080/09613218.2018.1440716.



Magnetic fields: influence of their properties in the agricultural production process

Campos magnéticos: influencia de sus propiedades en el proceso de producción agrícola

Pablo Montero-Prado ^{1*} , César Almanza-Cruz ¹ 

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, Centro de Innovación y Transferencia Tecnológica, Panamá

pablo.montero@utp.ac.pa; cesar.almanza@utp.ac.pa

Fecha de recepción: 4 de abril de 2022; Fecha de aprobación: 20 de mayo de 2022.

*Autor de correspondencia: Pablo Montero-Prado (pablo.montero@utp.ac.pa)

ABSTRACT. Current efforts to achieve the Sustainable Development Goals to combat and eradicate hunger have led different specialized sectors of society to launch themselves in search of ways that lead to this end. In this sense, the research, development, and innovation (R+D+i) approach has generated various optimized methods to obtain the greatest possible benefits, through important contributions such as the development of varieties with greater resistance to pests and diseases, adverse weather conditions, use of biological agents, agriculture in a controlled environment, among others. The objective of this document is to show the advances in the application of magnetic fields as a tool to improve the productivity of different crops, as part of the techniques of recent application in the agricultural field. Considering the main treatment methods, application characteristics, and the explanation of the possible effects caused in plant entities. Attempts have been made to use scientific articles from different databases, but with significant levels of reliability, measured through the impact indices involved. With a few exceptions, the review of documents published, preferably in the last ten years, and based mostly on specialized conceptualizations was used as a way to find out what is going on with this topic right now.

Keywords. *Cultivation, irrigation, magnetic fields, plants, seeds, water.*

RESUMEN. Los esfuerzos actuales por alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible para combatir y erradicar el hambre han llevado a distintos sectores especializados de la sociedad a lanzarse en la búsqueda de caminos que conduzcan a este fin. En este sentido, el enfoque de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) ha generado diversos métodos optimizados para obtener los mayores beneficios posibles, a través de importantes aportes como el desarrollo de variedades de mayor resistencia a plagas y enfermedades, a condiciones climáticas adversas, utilización de agentes biológicos, agricultura en ambiente controlado, entre otros. El objetivo de este documento es mostrar los avances en la aplicación de campos magnéticos como herramienta para mejorar la productividad de diferentes cultivos, como parte de las técnicas de reciente aplicación en el campo agrícola. Considerando los principales métodos de tratamiento, características de la aplicación, y la explicación de los posibles efectos ocasionados en las entidades vegetales. Se ha intentado utilizar artículos científicos de diferentes bases de datos, pero con importantes niveles de fiabilidad, medidos a través de los índices de impacto implicados. Como herramienta para conocer la situación actual de este tema, se enfocó, con contadas excepciones, la revisión de documentos publicados, preferentemente, durante la última década, basados principalmente en conceptualizaciones especializadas.

Palabras clave. *Cultivo, riego, campos magnéticos, plantas, semillas, agua.*

1. Introduction

The United Nations (UN), established in 2015, the 2030 schedule with the implementation of 17 Sustainable Development Goals (SDGs), to achieve a better world and better standards of living for populations [1]. The second objective of the SDGs proposes directing efforts

to Achieve Food Security, improve nutrition levels, and at the same time, Sustainable Agriculture that could allow reaching levels of “Zero Hunger” by 2030 [2].

In this respect, the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) affirms that the achievement of this objective is invariably necessary to

develop, strengthen, and innovate within current agricultural systems [3]. FAO has considered the promotion of cereal crops of great global importance because most of them are used for direct human nutrition. In addition, due to the need to increase the availability of protein for human consumption, through an increase in animal protein, it is necessary to explore the possibility of converting certain plant resources of considerable nutritional value into products of high protein value through forage production. [4-5].

Among the cereals with the greatest impact are corn, wheat, and rice, which are considered fundamental crops to achieve food security, considering that currently around 2,260 tons are produced together per year [6]. These cereals can provide about 43% of the world's dietary calories, 37% of proteins, and 6% of fats [3].

Generally, agricultural production can be affected by multiple factors such as temperature, light, wind, erosion, availability of nutrients, water, soil preparation, weeds, crop establishment, pests, pathogens, and, other biotic and/or abiotic factors [7-8]. In short, it is sought that the crops have superior germination characteristics, purity, reversible dormancy levels, use the least number of seeds per area, improve the vegetative development of the plant, and optimize the level of use of the different factors, maximizing the production of plants by cultivated area [9].

Currently, considerable amounts of non-certified seeds are used, which can be reflected in the decrease in their germination capacity and the effective physiological development of the plants, to the detriment of crop yields. One possibility is the improvement of crop yields per planted area, either by enhancing seed germination or increasing the physiological performance of plants.

Considering the above, it should be noted, that several studies indicate that it is possible to improve and even maximize the production capacity of different plant species by applying magnetic fields to the seeds, before the sowing process [10-17], on irrigation water [13], [15], [18], and in some cases, on the plants themselves [19-20].

This document aims to show the potential represented using different alternatives for the application of magnetic fields to improve and enhance the performance of different crops during the various stages of their

development, such as germination, growth, and fruiting of these. For this, multiple publications on this topic will be analyzed. Table 1 shows a summary of them, according to the different applications made, the crops that have been treated in each of them, and their corresponding findings. All these applications will be considered throughout this document.

1.1. Problematic

According to the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), as the population grows, the land and water resources for food production are diminishing. To avoid a crisis, they recommend directly addressing a variety of issues, including: 1). Production, governments should promote better crop and seed management techniques; 2). Poverty, small producers need the support and benefit of technologies and methods to cover small-scale needs; 3). Hybrid technology, despite the generation of high-yield varieties, the production costs of these are four or five times that of normal seeds, something out of the reach of most small farmers [21].

Poor germination, or its total failure, gives rise to a poor population of plants in crops made by direct sowing, and with low grain production yields. The low levels of germination in the seeds may be due to different circumstances: 1). Loss of seed viability; 2). Excessive seed dormancy; 3). Soil conditions (excessively dry, wet, or cold) are unsuitable for germination [9]. By achieving maximum seed yield, plant growth and yield can be enhanced through better fruits and higher crop yields [22-23].

Due to the need for environmentally friendly treatments to improve and enhance crop yield, studies have emerged that involve the use of magnetic fields as physical treatments, to increase seed germination and seedling emergence as part of safe tools in agricultural production systems [24-28].

Table 1. Summary of the achievements, according to the applications and specific conditions of the assays.

Application		Intensity of magnetic field (mT)	Time of treatment	Achievements	References
Seeds	sunflower (Helianthus annuus)	200	2h	> germination 13% > vigor I and II (treated seeds vs control)	[17]
	tomato (Pusa Ruby)	100 to 120	15 to 30 min	> germination 14% > vigor 40% > stem 8.6% > root 33%	[29]
	onion (Allium cepa L.)	160	15min	> germination 40% > root 20% > leaves 43.6% > bulb weight 11%	[10]
	Triticale (x Triticosecale Wittmack)	150 to 250	24h	> germination 19%	[11]
	durum wheat (Triticum durum)	12.5	15, 30 and 45min	> germination 30% > chlorophyll 26.5%	[12]
	oil palm (Elaeis guineensis)	2.5, 5.0, 7.0, 9.0 and 11.0	1, 2, 3, 4 and 5h	> germination 96%	[15]
Plants	lemon balm (Melissa officinalis)	50, 100 and 150	5, 15 and 30min; 1 and 3h	> shoot growth 56% > bioactive and phenolic components	[19-20]
Irrigation water	celery (Apium graveolens) and pea plants (Pisum sativum)	3.5 to 136	3s	> vegetal material, celery 12% pea plants 7.8%	[13]
	Turnip (Brassica rapa L.)	211	30, 45 and 60min	> germination 25%	[18]
	oil palm (Elaeis guineensis)	2.5 to 11.0	24h	> upgrowth 210%	[15]

2. Materials and methods

2.1. Treatments

Multiple studies have been carried out that show the possibility of obtaining different interactions and results by applying magnetic fields on different parts of plants, from the seed to the irrigation water, at different times and intensities.

2.1.1. Seed

The seeds represent one of the most important links in the development of crops because it is the structure that contains the condensed resources, at rest, necessary for the generation of a new plant. Due to this, efficient development of it is required [23].

Vashisth & Nagarajan [17] reported applying magnetic fields from 0 to 250mT in steps of 50mT from 1 to 4h in steps of 1h to sunflower seeds (*Helianthus annuus*). Of these treatments, 50 and 200mT for 2h produced the maximum yield, achieving an increase of 13% in the germination of treated seeds compared to untreated seeds. They also evaluated the germination speed, given by the number of germinated seeds per day. The control showed a speed of approximately 27 seeds per day, while, for the treated seeds, the speed was 33 seeds per day (200mT, 2h). Additionally, the vigor indexes I and II were considered, the vigor index I was calculated by dividing the germination percentage by the length of the seedling (stem and roots), the vigor index II was calculated by dividing the germination percentage by the weight of the dehydrated seedling (stem and roots), finding that the vigor index I varied from 1,500 to 3,000 for the control and the treated seedling, the vigor index II, varied from 3.3 to 4.4 approximately (200mT, 2h). However, a linear relationship was not found between the intensities of the applied magnetic field and the improvement in the different parameters evaluated.

Treatment of tomato seeds (tomato variety from North India - *Pusa Ruby*) with magnetic fields increased their germination levels by 14% compared to the control (120mT, 15min). The vigor of the seedlings increased by 40% in the treated seeds concerning the control seeds (100mT, 30min), in the treated seed. The length of the seedlings increased from 9.3 to 10.1cm at the stem and from 7.2 to 9.6cm at the root (100mT, 30min). Measurements were made on 8 days [29].

On the other hand, in tests carried out on dry onion (*Allium cepa L.*) seeds, it was found that the germination potential was 7.5% at 7 days and 11% at 14 days (160mT,

15min). In the same study, it was found that the daily growth of the roots varied from 10mg/day in the control to 12mg/day in the treated plants. In the case of the leaves, the growth varied from 14mg/day to 75mg/day (160mT, 15min). The average weight of the bulbs produced (grams) increased by 11.15% in the treated seeds comparing to the controlled ones (160mT, 15min). In this sense, the yield of the bulbs per growing area (Kg/m^2) improved by 40% in the treated seeds concerning the untreated seeds (160mT, 15min) [10].

Triticale (*x Triticosecale Wittmack*), a cereal obtained from the cross between wheat and rye, was tested. The seeds treated with magnetic fields achieved an improvement in the germination level of 19% compared to the untreated seeds (150 to 250mT, 24h). Seedling length measurements were made at 2, 4, and 6 days after "sowing", observing significant improvements of the treated seeds compared to the control seeds in 71, 77, and 68% respectively (250mT, 24h), which indicates that the seedling with seed treatment developed faster and more abundantly [11].

Studies have been carried out on the application of magnetic fields to seeds of durum wheat (*Triticum durum*), variety simeto and grecale [12]. A magnetic field intensity of 12.5mT was applied for 15, 30, and 45min. They were able to demonstrate significant improvements in the levels of germination, development, and growth of the plants. The germination level of the seeds treated for 15, 30, and 45min improved from 15.07, 21.85, and 30.46% respectively, for the variety simeto and, 9.93, 12.37 and 12.94% concerning the control, for the grecale variety. Most importantly, they found that higher levels of yield were achieved in kg/ha of the treated crop compared to untreated crops.

Oil palm (*Elaeis guineensis*) seeds have, as a characteristic, difficulty in the germination process, considering that normally it can take 6 to 12 months. In addition, they maintain a 40% probability of failure [30]. Given this situation, the behavior of oil palm seeds was studied at different intensities of magnetic fields (2.5, 5.0, 7.0, 9.0, and 11.0mT) during five different exposure times (1, 2, 3, 4, and 5h). The seeds treated with a magnetic field intensity of 9.0mT, for 4h, achieved better performance, achieving a germination level of 96% at 30 days of the trial. In the other treatments, slightly lower germination levels were observed, compared to no control seed germinated in this same period, which represents significant improvements in the capacity and

germination time of oil palm seeds exposed to magnetic fields [15].

2.1.2. Plants

A variant in the use of magnetic fields to improve crop yields focuses on exposing the seedlings after germination.

In this respect, it has been shown that the application of three different magnetic fields (50, 100, and 150mT) with 5 different exposure times (5, 15 and 30min, 1 and 3h) on lemon balm plants (*Melissa officinalis*) promotes better propagation and growth of its shoots, with an increase of up to 50.6% compared to the control. In addition, a higher number of shoot regeneration was observed (from 3.3 to 8.5 shoots for the bud tip explant and from 2.8 to 9.3 shoots for the hypocotyl bud explant). The increased content of bioactive and phenolic components, as well as its corresponding enzyme involved, the phenylalanine ammonium lyase (PAL). In addition, a better response was observed due to the stress generated, through the free radical scavenging activity of the enzymes superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) [19-20].

2.1.3. Irrigation water

Water is one of the necessary factors for all life processes. In agricultural activities, it becomes an essential resource for continuous use to obtain food. It is necessary to emphasize that water can be modified, with relative ease, by the action of magnetic fields [13], [15], [31].

Maheshwari & Singh Grewal [13], point out that the use of magnetized water significantly increases the yield and productivity of celery (*Apium graveolens*) and pea plants (*Pisum sativum*), by 12 and 7.8% respectively, with respect to untreated plants, using ranges of 3.5 to 136mT.

On the other hand, Haq et al., [18], point out that, by using magnetic field treatment on irrigation water, with an intensity of 211mT at variable times of 30, 45 and 60minutes, it was possible to achieve considerable improvements over the germination levels of turnip seeds (*Brassica rapa L.*), reaching germination levels of 72, 79.5 and 90% compared to 64.5% of the untreated seeds.

Sudsiri et al., [15], reported that it was possible to find significant differences in the growth rate of young oil palms irrigated with water treated with magnetic fields (2.5 to 5.0mT), compared to plants irrigated with water

without treatment. For this, they used normal water (water + ions, pH of approximately 8.2, and electrical conductivity of approximately 600 μ siemens/m) subjected to magnetic fields generated by strontium isotropic permanent magnets for 48 hours. After exposure, the treated water showed a conductivity of close to 1400 μ siemens/m. The results indicate that the oil palm plants, with magnetically treated irrigation water, grew 3 times faster than the plants irrigated with normal water, at a rate of 3.1mm/day for the treated plants against 1 mm daily in the plants without treatment.

2.2. Mechanism of action

Various studies have been carried out to find out the effect caused by the application of magnetic fields directly on different kinds of seeds and on the water used to irrigate them. Although satisfactory results have been found in most of them, the physiological effect that promotes the satisfactory development of plants is not entirely clear.

Some research suggests the possibility that the application of magnetic fields interferes with the calcium ion sequestration mechanism, modifying the concentration of these in the seedling system, and generating accelerated cell division activity [29], [32].

On the other hand, the possibility has been raised that the applied magnetic fields can generate modifications in the enzymatic activity [12], [17]. Katsenios et al., [12], reported that from the fourth day of the application of the treatments (15, 30, and 45min) the observed enzymatic activity of α -amylase was significantly higher compared to the untreated seeds (control). Additionally, they found that the chlorophyll content (μ g/cm²) of the durum wheat plants was significantly higher in the magnetic field treatments to the control, for the simeto variety, varying from 24.54 to 26.5% in the simeto variety and 3.55 to 9.01% in grecole variety. Vashisth & Nagarajan, [17], in turn, reported that, in sunflower seeds, the activity of the enzyme α -amylase is increased in the magnetically treated seeds. α -amylase is the enzyme responsible for the degradation of the nutrient reserves contained in the seed, which implies a greater availability of nutrients during the first stages of germination and growth of the seedlings.

Another hypothesis generated in test son pea seeds is that the application of magnetic fields influences the structure of the cell membrane, modifying its permeability, affecting its metabolic pathways through

the transport of ions through it [33]. In this same way, García and Arza [34], found that the seeds treated with magnetic fields, considerably increase the levels of water absorption, they consider that the magnetic fields interact with the ionic currents, modifying the osmotic pressure and the concentration of ion on both sides of the cell membrane.

On the other hand, the application of magnetic fields may influence the defense capacity of seeds and plants against the attack of infections, as reported by Agustrina, R. et al., [35], by evaluating the response of tomato seeds treated against infection caused by *Fusarium oxysporum*.

Additionally, it is possible that some of the characteristics achieved through the application of magnetic fields in the seeds, such as early germination of these, generate a greater development of the root system of the seedlings, allowing greater efficiency in the processes of extraction of nutrients and soil moisture [33].

The magnetic treatment may produce stability of the pH of the water through the variation of its ionization, due to the modification of the bonds [36]. This same variation can cause variations in the concentration and availability of calcium (Ca), phosphorus (P), nitrogen (N), potassium (K), sodium (Na), magnesium (Mg) in the soils used for crops [37-38].

2.3. Adverse effects

It is worth mentioning that, throughout the literature review carried out, no negative effects were found that can be directly linked to the use of magnetic fields in the different application alternatives. However, it was shown that the results do not reflect linear behavior in all the cases studied.

3. Results and discussion

Advantages of the technique

In a general way, it is necessary to point out that organisms are naturally influenced by terrestrial magnetism. Nevertheless, an interaction produced outside this area will have some repercussions on the vital processes of the organisms involved [8], [14]. Currently, there is no consensus on the most effective combination of strength and duration [29]. However, various morphological and geometric arrangements have been designed to generate external magnetic fields for different purposes. For example, applications that induce

the orientation of water molecules, for example, it orders, stabilizes, and facilitates the freezing of refrigeration processes [39]. In addition to this, it has been shown that it is possible to activate and accelerate the growth of microorganisms and plants using weak magnetic fields, that is, of low intensity [40]. This indicates to us the viability of manipulating this force of nature for our benefit.

The conditions currently used in the various studies carried out to visualize the effects generated on the seeds and the development of the plants do not represent a risk to the individual health of the species and of the human being [17]. However, conditions and limitations have been established to ensure the safety of exposed organisms. European regulations [16], establish levels of 2T for normal work situations and 8T for controlled working conditions. Considering intensities greater than 7T as ultra-high fields, magnetic fields of 1.5 to 3T, strong intensities.

In fact, the magnetic and electromagnetic treatments that are being used in agriculture are considered non-invasive conditions and tools, on the contrary, they are considered affordable, clean, safe, and environmentally friendly methods [15], [33], [41-43].

4. Conclusions

Increasing the yield of different crops by improving the performance and development of seeds and plants is not a very insignificant objective for many organizations and governments worldwide. If we consider that this potential is intrinsically involved with the fulfillment of some of the United Nations Sustainable Development Goals: a). Goal 1. "End of Poverty"; b). Objective 2. "Zero Hunger"; c). Objective 10. "Reduction of Inequalities". All of this would make it possible to achieve a considerable social impact by improving the income of producers and other indirect beneficiaries, which would make it possible to overcome poverty levels, fighting at the same time inequality towards producers, through access to technologies such as tools to improve production systems. For the adoption of this technology as an environmentally friendly tool, it is necessary to carry out multiple studies that allow adapting the application characteristics according to the properties of each crop, and according to the specific conditions of the region where the farms will be established.

ACKNOWLEDGMENT

The authors thank the Technological University of Panama for the logistical and infrastructure support for the preparation of this document. At the same time, they thank the members of the Agrotechnology Innovation, Development and Transfer Research Group (IDTAT), for their constant and selfless support.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare that they have no conflict of interest.

CONTRIBUTION AND APPROVAL OF THE AUTHORS

The contribution of each author is specified below: Research, P.M., C.A.; Conceptualization, P.M.; Preparation and correction of the article, P.M., C.A.; Supervision, PM.

All authors affirm that the final version of this article was read and approved.

REFERENCES

- [1] United Nations 2015 United Nations Sustainable Development – 17 Goals to Transform Our World. [online] Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>
- [2] United Nations 2015 Goal 2: Zero Hunger – United Nations Sustainable Development. [online] Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/hunger/>
- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations 2016 Save and Grow in practice: maize, rice, wheat. [online] Available at: http://www.fao.org/ag/save-and-grow/MRW/index_en.html
- [4] Food and Agriculture Organization 2002 Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030. [online] Available at: <http://www.fao.org/3/y3557s/y3557s08.htm>
- [5] Hincapie E. A., Osorio J. T. and Lopez L. B. 2010. Efecto del campo magnético sobre la germinación de la Leucaena Leucocephala. *Scientia Et Technica*. 16(44), 337–41
- [6] Food and Agriculture Organization of the United Nation. 2020. FAOSTAT statistical database. [online] Available at: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- [7] Mahajan T. S. and Pandey O. P. 2014. Magnetic-time model at off-season germination *International Agrophysics*. 28(1), 57–62.
- [8] Radhakrishnan R. and Ranjitha Kumari B. D. 2012. Pulsed magnetic field: A contemporary approach offers to enhance plant growth and yield of soybean. *Plant Physiology and Biochemistry*. 51, 139–44.
- [9] Chaudhary R. C., Nanda J. S. and Tran D. V. 2003. Problemas y limitaciones de la producción de arroz. Comisión Internacional del Arroz. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. [online] Available at: <http://www.fao.org/3/y2778s/y2778s04.htm>
- [10] De Souza A. 2014. Improvement of the seed germination, growth and yield of onion plants by extremely low frequency non-uniform magnetic fields. *Scientia horticulturae*, 176(11), 63–69.
- [11] Florez M., Martinez E. and Carbonell V. 2014. Germination and initial growth of triticale seeds under stationary magnetic fields. *Journal of Advances in Agriculture*, 2(2), 72–79.
- [12] Katsenios N., Bilalis D., Efthimiadou A., Aivalakis G., Nikolopoulou A-E., Karkanis A. and Travlos I. 2016. Role of pulsed electromagnetic field on enzyme activity, germination, plant growth and yield of durum wheat. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 6, 152–158.
- [13] Maheshwari B. L. and Grewal H. S. 2009. Magnetic treatment of irrigation water: Its effects on vegetable crop yield and water productivity. *Agricultural Water Management*, 96(8), 1229–1236.
- [14] Martínez E., Carbonell M. V., Flórez M., Amaya J. M. and Maqueda R. 2009. Germination of tomato seeds (*Lycopersicon esculentum* L.) under magnetic field. *International Agrophys*, 23(1), 44–50.
- [15] Sudsiri C. J., Jumba N., Kongchana P. and Ritchie R. J. 2017. Stimulation of oil palm (*Elaeis guineensis*) seed germination by exposure to electromagnetic fields. *Scientia Horticulturae*, 220, 66–77.
- [16] The European Parliament and the Council of the European Union. 2013. Minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). [online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj>
- [17] Vashisth A. and Nagarajan S. 2010. Effect on germination and early growth characteristics in sunflower (*Helianthus annuus*) seeds exposed to static magnetic field. *Journal of Plant Physiol*, 167(2), 149–56.
- [18] Haq Z. ul., Iqbal M., Jamil Y., Anwar H., Younis A., Arif M., Fareed M. Z. and Hussain F. 2016. Magnetically treated water irrigation effect on turnip seed germination, seedling growth and enzymatic activities. *Information Processing in Agriculture*, 3(2), 99–106.
- [19] Ulgen C., Yildirim A. and Turker A. 2020. Enhancement of Plant Regeneration in Lemon Balm (*Melissa officinalis* L.) with Different Magnetic Field. *Applications International Journal of Secondary Metabolite*, 7(2), 99–108.
- [20] Ulgen C., Yildirim A. B., Sahin G. and Turker A. U. 2021. Do magnetic field applications affect in vitro regeneration, growth, phenolic profiles, antioxidant potential and defense enzyme activities (SOD, CAT and PAL) in lemon balm

- (*Melissa officinalis* L.). *Industrial Crops and Products* 169(1), <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113624>
- [21] Food and Agriculture Organization of the United Nation 2004 Año Internacional del Arroz 2004: Todo sobre el arroz. [online] Available at: <http://www.fao.org/rice2004/es/aboutrice.htm>
- [22] Doria J. 2010. Generalidades sobre las semillas: su producción, conservación y almacenamiento. *Cultivos Tropicales*, 31(1), 74-85.
- [23] He D. and Yang P. 2013. Proteomics of rice seed germination. *Frontiers in Plant Science*, 4, 1-9.
- [24] Araújo S. de S., Paparella S., Dondi D., Bentivoglio A., Carbonera D. and Balestrazzi A. 2016. Physical methods for seed invigoration: Advantages and challenges in seed technology. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1-12.
- [25] Golbaz G. and Kaviani B. 2019. Effect of magnetic field on growth and development parameters of *Rudbeckia hirta* L. seed in dry and humid conditions. *Journal of Ornamental Plants*, 9(4), 233-243.
- [26] Isaac Alemán E., Barrera Roca L., Fung Boix Y. and Ferrer Dubois A. E. 2020. Efecto del tratamiento electromagnético de frecuencia extremadamente baja en el proceso de germinación de habichuela (*Vigna unguiculata* L.). *Centro Agrícola*, 47(3), 51-58.
- [27] Radhakrishnan R. 2019. Magnetic field regulates plant functions, growth and enhances tolerance against environmental stresses. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 25(5), 1107-1119.
- [28] Sarraf M., Kataria S., Taimourya H., Santos L. O., Menegatti R. D., Jain M, Ihtisham M. and Liu S. 2020. Magnetic field (MF) applications in plants: An Overview. *Plants*, 9(9), <https://doi.org/10.3390/plants9091139>
- [29] Vashisth A., Singh R. and Joshi D. K. 2013. Effect of static magnetic field on germination and seedling attributes in tomato (*Solanum lycopersicum*). *Journal of Agricultural Physics*, 13(2), 182-185.
- [30] Myint T., Chanprasert W. and Srikul S. 2010. Germination of seed of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) as affected by different mechanical scarification methods. *Seed Science and Technology*, 38(3), 635-645.
- [31] Zhou B., Yang L., Chen X., Ye S., Peng Y. and Liang C. 2021. Effect of magnetic water irrigation on the improvement of salinized soil and cotton growth in Xinjiang. *Agricultural Water Management*, 248(1), <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106784>
- [32] Hussain M. S., Dastgeer G., Afzal A. M., Hussain S. and Kanwar R. R. 2020. Eco-friendly magnetic field treatment to enhance wheat yield and seed germination growth. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 14, <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100299>
- [33] Iqbal M., Haq Z., Malik A., Ayoub Ch. M., Jamil Y. and Nisar J. 2016. Pre-sowing seed magnetic field stimulation: A good option to enhance bitter melon germination, seedling growth and yield characteristics. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 5, 30-37.
- [34] García F. and Arza L. 2001. Influence of a stationary magnetic field on water relations in lettuce seeds. Part I: Theoretical considerations. *Bioelectromagnetics*, 22(8), 589-595.
- [35] Agustrina R., Nurcahyani E., Pramono E., Listiana I. and Nastiti E. 2016. The influence of magnetic field on the growth of tomato (*Lycopersicon esculentum*) infected with *Fusarium oxysporum*. *International Series on Interdisciplinary Science and Technology*, 1(1), 34-37.
- [36] Ijaz B., Jatoi S. A., Ahmad D., Masood M. S. and Siddiqui S. U. 2012. Changes in germination behavior of wheat seeds exposed to magnetic field and magnetically structured water. *African Journal of Biotechnology*, 11(15), 3575-3585.
- [37] Bagherifard A. and Ghasemnezhad A. 2014. Effect of Magnetic Salinated Water on some Morphological and Biochemical Characteristics of Artichoke (*Cynara scolymus* L.) Leaves. *Journal of Medicinal plants and By-product*, 3(2), 161-170.
- [38] Hasan M. M., Alharby H. F., Hajar A. S., Hakeem K. R. and Alzahrani Y. 2019. The Effect of Magnetized Water on the Growth and Physiological Conditions of Moringa Species under Drought Stress. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(3), 1145-1155.
- [39] Abie S. M., Münch D., Egelanddal B., Bjerke F., Wergeland I. and Martinsen Ø. G. 2021. Combined 0.2 T static magnetic field and 20 kHz, 2 V/cm square wave electric field do not affect supercooling and freezing time of saline solution and meat samples. *Journal of Food Engineering*, 311, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110710>
- [40] Li W., Ma H., He R., Ren X. and Zhou C. 2021. Prospects and application of ultrasound and magnetic fields in the fermentation of rare edible fungi. *Ultrasonics Sonochemistry*, 76, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105613>
- [41] Efthimiadou A., Katsenios N., Karkanis A., Papastilianou P., Triantafyllidis V., Travlos I. and Bilalis D. J. 2014. Effects of Presowing Pulsed Electromagnetic Treatment of Tomato Seed on Growth, Yield, and Lycopene Content. *The Scientific World Journal*. 2014, <https://doi.org/10.1155/2014/369745>
- [42] Haq Z., Jamil Y., Irum S., Randhawa M., Iqbal M. and Amin N. 2012. Enhancement in Germination, Seedling Growth and Yield of Radish (*Raphanus sativus*) Using Seed Pre-Sowing Magnetic Field Treatment. *Polish Journal of Environmental Studies*, 21(2), 369-374.
- [43] Iqbal M., Haq Z., Jamil Y. and Ahmad M. R. 2012. Effect of presowing magnetic treatment on properties of pea. *Internstionsl Agrophys*, 26(1), 25-31.



Calidad y seguridad de la leche cruda de vaca producida en Panamá

Quality and safety of raw cow's milk produced in Panama

Pablo Montero-Prado ^{1*} 

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, Centro de Innovación y Transferencia Tecnológica, Panamá

pablo.montero@utp.ac.pa

Fecha de recepción: 5 de agosto de 2021; Fecha de aprobación: 27 de febrero de 2022.

***Autor de correspondencia:** Pablo Montero-Prado (pablo.montero@utp.ac.pa)

RESUMEN. La leche proporciona nutrientes esenciales y es una fuente importante de energía alimentaria, proteínas de alta calidad y grasas. Contribuye considerablemente a la ingestión necesaria de nutrientes como el calcio, magnesio, selenio, riboflavina, vitamina B12 y ácido pantoténico. El consumo de este alimento puede representar diferencias en la calidad de las dietas de las personas sin acceso a una nutrición adecuada, especialmente entre los niños. La composición de la leche varía de acuerdo con la incidencia de múltiples factores como la raza, tiempo de lactancia, alimentación, genética, condición climática, estado de salud y estrés de los animales, etc. La calidad y seguridad de la leche cruda de vaca puede verse perjudicada por diferentes razones, microorganismos, residuos químicos y otros contaminantes, lo que incide significativamente sobre la salud pública. El incremento de microorganismos en la leche causa importantes pérdidas. Actualmente, existe muy poca o ninguna publicación o referencia a nivel nacional que indique una caracterización de calidad de la leche cruda de vaca según su condición fisicoquímica, ni microbiológica. No obstante, los escasos trabajos existentes evidencian condiciones que requieren un mayor estudio y seguimiento para considerar el estado general de los hatos lecheros del país. De lo anterior, se desprende la necesidad de realizar estudios de Investigación, Desarrollo e innovación (I+D+i), que permitan establecer las condiciones de calidad de la leche que se produce en el país y correlacionar esta condición a los parámetros de calidad establecidos internacionalmente.

Palabras clave. *Leche cruda de vaca, calidad de leche, parámetros fisicoquímicos, composición, microbiología.*

ABSTRACT. Milk provides essential nutrients and is an important source of dietary energy, high-quality protein, and fat. It contributes considerably to the necessary intake of nutrients such as calcium, magnesium, selenium, riboflavin, vitamin B12 and pantothenic acid. The consumption of this food can represent differences in the quality of the diets of people without access to adequate nutrition, especially among children. The composition of milk varies according to the incidence of multiple factors such as breed, lactation time, feeding, genetics, climatic condition, health status and stress of the animals, etc. The quality and safety of raw cow's milk can be affected by varied reasons, microorganisms, chemical residues, and other contaminants, which significantly affects public health. The increase of microorganisms in milk causes significant losses. Currently, there is very little or no publication or reference at the national level that indicates a quality characterization of raw cow's milk according to its physicochemical, or microbiological condition. However, the few existing studies show conditions that require further study and monitoring to consider the general state of the country's dairy herds. From the above, it is clear the need to conduct research, development and innovation (R & D & i) studies, which make it possible to establish the quality conditions of the milk produced in the country and correlate this condition with the internationally established quality parameters.

Keywords. *Raw cow's milk, milk quality, physic-chemical parameters, composition, microbiology.*

1. Introducción

La leche es el único material producido por la naturaleza que funciona exclusivamente como fuente de alimento, ya que constituye una fuente nutricional completa, no superada por ninguna otra conocida por el

ser humano [1]. La leche es uno de los fluidos biológicos más complejos y de significativa importancia como alimento básico a nivel mundial debido a la riqueza nutritiva de sus componentes [2]. En esencia, la leche es la secreción de las glándulas mamarias de mamíferos,

cuyo principal objetivo es la nutrición de las crías. Los principales animales que proveen leche para consumo humano son las vacas, búfalas, cabras y ovejas, ya sea en su condición natural o mediante una amplia gama de productos lácteos [3], [4].

La leche proporciona nutrientes esenciales y es una fuente importante de energía alimentaria, proteínas de alta calidad y grasas. La leche puede contribuir considerablemente a la ingestión necesaria de nutrientes como el calcio, magnesio, selenio, riboflavina, vitamina B12 y ácido pantoténico. La leche y los productos lácteos son alimentos ricos en nutrientes y su consumo puede hacer más diversa las dietas basadas principalmente en el consumo de vegetales. La leche de origen animal puede desempeñar un papel importante, principalmente, en las dietas de los niños en poblaciones con bajo nivel de ingestión de grasas y acceso limitado a otros alimentos de origen animal. El consumo de este alimento, puede representar diferencias en la calidad de las dietas de las personas sin acceso a una nutrición adecuada, especialmente entre los niños [5]. En este sentido, en los últimos años, la producción mundial de leche supera los 600 millones de toneladas anuales según la Dirección de Estadística de la FAO [6]. Los principales productores son los países de la Unión Europea, Estados Unidos y la Federación de Rusia, que aportan alrededor del 45%.

2. Composición

La leche está constituida principalmente de sales diluidas, azúcar simple, minerales, vitaminas, grasa y proteínas. La composición de la leche no es constante, debido a que esta secreción es sensible a influencias fisiológicas de los animales productores [3], [7], [8]. Incluso, es posible observar variaciones de composición de un ordeño a otro en el mismo animal [4], [8]. Esto indica, la necesidad de llevar a cabo constantes monitoreos y controles para asegurar el mantenimiento de niveles óptimos de calidad de esta. Se han realizado múltiples estudios, buscando establecer las condiciones de influyen sobre la composición y la calidad de la leche. Entre ellos, destacan:

A. Factores naturales

a. **Etapa de lactancia:** Dado que la producción de leche es iniciada específicamente por el nacimiento de un nuevo individuo. Este hecho, regula las características

de la leche producida para satisfacer las necesidades en las diferentes etapas de los recién nacidos. Actualmente, este periodo puede alcanzar alrededor de 300 días divididos en diferentes etapas de lactancia [8], [9].

b. **Estacionalidad:** Las variaciones climáticas causan suficiente estrés en los animales productores como para afectar el proceso de producción de leche, sobre todo en las concentraciones de sus múltiples componentes. Considerando que los cambios estacionales causan afectaciones como el aumento de los niveles de calor, variaciones de los niveles de humedad, etc. [7], [10].

c. **Alimentación:** Considerando que los componentes de la leche se producen a partir de los elementos adquiridos por la dieta de los animales. Es de esperar, que las características de la alimentación y el estado nutricional de los mismos, influya significativamente en la composición final de la leche [3], [7], [8].

d. **Factores genéticos:** Existen múltiples estudios realizados que indican que la heredabilidad genética influye en diferentes propiedades relacionadas a la leche producida, por ejemplo, los niveles de producción de leche, minerales, composición de grasas y proteínas, etc. [7], [8], [11]–[13].

e. **Raza:** Una amplia variedad de estudios han encontrado que las diferentes razas de vacas difieren en el rendimiento y composición de la leche que producen, debido principalmente a diferencias en la capacidad de síntesis entre las diferentes razas [8], [11], [14], [15].

B. Otras causas

a. **Microbiología:** El impacto producido por la proliferación de microorganismos suelen ser los más notorios. Sobre salen, la disminución del pH por la transformación de la Lactosa en ácido láctico, la lipólisis y proteólisis, que afectan directamente las propiedades físico-químicas de la leche [4], [16], [17].

b. **Mastitis y recuento de células somáticas:** La presencia de células somáticas en la leche puede ser considerado normal hasta ciertos niveles. Sin embargo, un aumento considerable de las mismas, debido a la incidencia de mastitis, genera importantes pérdidas desde la disminución de la producción de leche, hasta la muerte y sacrificio de los animales [18]–[21].

c. **Contaminación:** La composición y calidad de la leche puede verse afectada además, por la presencia

de contaminantes como antibióticos, adulterantes, residuos y aditivos químicos, contaminación ambiental, degradación de los nutrientes [22–24].

3. Características de calidad

En la actualidad, la clasificación global de la leche implica entre otras variables físicoquímicas como Densidad (D), pH, Grasa (F), Sólidos no Grasos (SNF), Sólidos Totales (ST), Lactosa (L) y Proteína (P). Por otro lado, se evalúan los niveles microbiológicos y contenido de células somáticas como parámetros de calidad de la leche cruda de vaca [9], [21], [24–27]. La leche cruda de vaca es la leche que después de ser ordeñada no ha sufrido procesos de transformación ni pasteurización [25], [28].

No obstante, el mayor impacto del deterioro de su calidad se debe principalmente al incremento de contaminación microbiológica [7], [17], [24], [26], [29]. Mantener una calidad microbiana óptima de la leche incide significativamente sobre la salud pública. Además, también es importante para evitar pérdidas de producción y lograr una vida útil óptima de los productos lácteos [17], [30–33]. Es necesario garantizar una buena calidad de la leche cruda, para esto, se desarrollan sistemas que garanticen esta calidad. Estos sistemas, establecen esquemas bacteriológicos en los sistemas de producción de leche cruda de vaca [7], [17], [26], [32], [34].

4. Afectaciones microbiológicas

El incremento de la presencia de microorganismos en la leche causa importantes pérdidas en las ganaderías lecheras. Como consecuencia directa del aumento de microorganismos en la glándula mamaria, origina la presencia de la mastitis [3], [24], [26]. Esta enfermedad, afecta la mayoría de los mamíferos, consiste en la inflamación de las glándulas mamarias causada principalmente por infección por patógenos bacterianos [19], [21], [24], [26], [35].

La mastitis se caracteriza por una amplia variedad de cambios físico-químicos y bacteriológicos en la leche, que afectan la calidad y características de la misma, condiciones estas que varían dependiendo de la gravedad de la inflamación, los agentes causales y las lesiones producidas, la eficacia del tratamiento, el nivel de

producción y la etapa de lactancia [35], [36]. La mastitis en bovinos es una de las enfermedades de los rebaños lecheros más costosas, considerando que da como resultado el aumento en los costos de producción y la disminución de la productividad. Aunque estos costos varían de acuerdo al lugar, se estima un promedio de pérdidas por cada episodio de la enfermedad de 179.00 USD por animal [35], [37–40]. Por otro lado, existe el peligro de que la contaminación bacteriana de la leche de las vacas afectadas pueda hacerla inadecuada para el consumo humano al causar intoxicación alimentaria o interferir con los procesos de fabricación o, en casos raros, proporcionar un mecanismo de propagación de enfermedades a los humanos [35].

El efecto negativo que causa la mastitis sobre la actividad lechera se debe a la amplia incidencia de la enfermedad. Considerando que al manifestarse la misma, se refleja una calidad higiénica, nutritiva y organoléptica de reduce significativamente, incluso, se refleja un aumento de los patógenos y células somáticas presentes en la leche, lo que aumenta la cantidad de leche que debe ser descartada, y la pérdida de calidad de productos procesados [5], [35], [36], [39], [41], [42]. Además de esto, diversos estudios demuestran que la incidencia de mastitis genera directamente pérdidas adicionales debido a la sustitución, muerte y sacrificio de los animales potencialmente rentables; daños irreversibles en el tejido secretor de leche de la ubre; la disminución de la ganancia genética; y la significativa reducción de la capacidad y eficiencia reproductiva y la transmisión de la enfermedad de vaca a vaca dentro de los rebaños [18–21], [39], [43–46]. De acuerdo al avance y desarrollo de la mastitis, esta puede presentarse de dos formas, como Mastitis Clínica y Mastitis Sub-clínica [26], [35], [40], [47].

La mastitis clínica es la inflamación en grados variables de la glándula mamaria, que da lugar a anomalías visibles de la leche o de la glándula [48], [49]. La mastitis clínica es diagnosticada por la aparición de signos clínicamente reconocibles de calor, dolor, enrojecimiento e hinchazón del cuarto infectado dentro de la ubre y con o sin enfermedad de la vaca [44], [48]. Además de esto, entre los principales medios de detección utilizados están la determinación visual de anomalías importantes en la leche, incluyendo, la

decoloración, leche serosa, la presencia de coágulos, escamas y pus, y la presencia de una gran cantidad de leucocitos [35], [50–53].

Por el contrario, la mastitis sub-clínica, no presenta características visibles que permitan realizar un diagnóstico de la presencia de la enfermedad. Tradicionalmente, para el diagnóstico de una mastitis sub-clínica, es necesaria la realización de cultivos y análisis clínicos a una gran cantidad de muestras de leche [54], [55], los que resulta ser demasiado caro y poco práctico para el uso rutinario [35], [40], [55], [56]. Una amplia cantidad de estudios previos [35], [41], [53], [55], [57–60] destacan la importancia en la detección y control de la mastitis subclínica por diferentes razones: a). Pérdidas debidas al deterioro de la calidad fisicoquímica de leche cruda, su procesamiento y derivados, b). Evolución hacia la mastitis clínica, c). Afectación crónica de la infección, d). Proliferación del contagio hacia otros animales del rebaño.

Se ha demostrado que el poco o ningún monitoreo y diagnóstico periódico del estado de salud de la ubre de los hatos lecheros presentan considerables impactos negativos en la calidad de los productos lácteos que son consumidos por la población y al mismo tiempo, pueden restringir la posibilidad de la exportación de estos productos, todo esto, logrando ser limitado mediante el control de la mastitis subclínica [53], [57], [61–66].

Investigaciones en los países desarrollados, y mayores productores de leche y derivados lácteos han generado y desarrollado diferentes metodologías para intentar identificar la presencia de la mastitis en estado subclínico. Entre ellas, podemos mencionar: a). Conteo de células somáticas; b). Reacción en cadena de la polimerasa en tiempo real (real-time PCR); c). PCR por electroforesis en gel de gradiente desnaturante (PCR-DGGE); d). Cultivos bacteriológicos; e). Diferencial de leucocitos de leche; f). Técnicas proteómicas a través de Cromatografía líquida (LC/MS/MS). [7], [16], [21], [22], [26], [51], [52], [55], [65], [67–79].

De todas estas herramientas, destaca el conteo de células somáticas (SCC), cuyo uso se ha extendido y profundizado en todo el mundo. Las células somáticas son las células provenientes del cuerpo, normalmente se encuentran presentes en la leche en bajas concentraciones. En condiciones normales, la mayoría de

estas células provienen del tejido secretor de la ubre y el resto, son glóbulos blancos (leucocitos) [39], [80]. Al producirse la infección intramamaria, se inicia un proceso de defensa, que induce a que el sistema inmunológico del cuerpo envíe una gran cantidad de glóbulos blancos a la ubre para combatir la infección, incrementando considerablemente la presencia de células somáticas (SCC) en la ubre y en consecuencia, en la leche [35], [39], [80–83].

En múltiples estudios, se utilizan diferentes conceptos para definir la mastitis subclínica. Algunos han considerado un $SCC > 200,000$ para considerar presencia de mastitis subclínica [51], [55], [71], [84–88]. Otros autores consideraron límites menos conservador, $SCC > 150,000$ [46], [89–91]; En 2011, Nguyen y otros, establecieron 4 niveles diferenciados de mastitis subclínica: 50,000 a 100,000 células; 100,000 a 200,000 células; 200,000 a 500,000 células; y mayores 500,000 células.

La producción mundial de leche y sus derivados, enfrenta un gran desafío como motor de desarrollo e instrumento para la lucha por lograr la seguridad alimentaria, la inocuidad alimentaria y eventualmente, será blanco del impacto de apertura global de los tratados de libre comercio. Es por esto que a nivel mundial, los países han estado gestionando normativas en cuanto a controlar los niveles de calidad de la leche cruda para enfrentarse a todos estos retos [7], [92]–[95].

5. Situación de la leche en Panamá

En Panamá, durante los últimos años, la producción de leche fresca ha sufrido fluctuaciones negativas. En cifras preliminares, en el 2019, la República de Panamá alcanzó una producción de 183 millones de litros, reflejando una disminución del 6% con respecto a los últimos 10 años [96]. La capacidad de satisfacer el consumo local está lejos de lograrse ya que generamos menos del 50% de la demanda. La producción nacional de leche se genera principalmente en pequeñas explotaciones, convirtiéndose en la principal fuente de ingreso de muchas familias. Existen aproximadamente 5.000 productores de leche. De estos, alrededor del 8% generan leche de nivel A, mientras que el 12 y el 80% proporcionan leche de nivel B y C, respectivamente. Según la normativa vigente, la producción de leche en

Panamá recibe una clasificación basada en la calidad de esta, nivel de leche A, nivel B y nivel C o Industrial. Esta clasificación (A, B y C) está relacionada principalmente con la carga bacteriana que tiene la leche: a). Leche de grado A <200.000 bacterias mL⁻¹; segundo). Leche de grado B <500.000 bacterias mL⁻¹; C). Leche de grado C, leche que no cumple con los parámetros requeridos por la leche de grado A y B [97]. De estas, las provincias Centrales (Coclé, Los Santos, Herrera y Veraguas) y Chiriquí aportan cerca del 85% de la producción nacional [98].

Actualmente, existe muy poca o ninguna publicación o referencia a nivel nacional que indique una caracterización de calidad de la leche cruda de vaca según su condición fisicoquímica, ni microbiológica. Únicamente se logró identificar un informe presentado a la FAO sobre calidad de la leche. El mismo, enfatiza la presencia de proceso infecciosos que afectan la ubre. Reportando un conteo de células somáticas de $967,181 \pm 499,619$ (células/mL) para leche grado A y $1,126,844 \pm 581,884$ (células/mL), para leche grado C. En cuanto al conteo bacteriológico, reportó que la leche grado A exhibió un conteo bacteriológico de 645,936 unidades formadoras de colonias (ufc) mL⁻¹ y la leche grado C, 1,403,740ufc mL⁻¹ [99].

En estudio realizado en La Chorrera, se demostró que en todas las fincas analizadas (3 fincas, 1155 animales aproximadamente) se mantuvo una incidencia de mastitis subclínica del 20.5%, indistintamente del nivel de tecnificación utilizado [100]. Por otro lado, Chang y otros, encontraron que aproximadamente el 56% de los animales evaluados estaban afectados por mastitis clínica y subclínica. Entre los animales con mastitis clínica, se encontraron pérdidas directas de hasta 30% en la producción de leche grado C [101]. Finalmente, en 2019 se realizó un estudio que permitió establecer rangos de valores indicativos para cada uno de los parámetros fisicoquímicos estudiados. Para todos ellos, se pudo observar una tendencia a que estos valores disminuyan a medida que disminuyen los grados de la leche cruda. Sin embargo, el estudio concluyó que no existen diferencias significativas entre los grados de leche considerados [102]. Esto indica la posibilidad de que la clasificación de la leche bovina en Panamá se debe únicamente al estado microbiológico de la misma.

6. Conclusiones

La leche proporciona nutrientes esenciales y es una fuente importante de energía alimentaria, proteínas de alta calidad y grasas. Contribuye considerablemente a la ingestión necesaria de diversos nutrientes. Por lo que el consumo de este alimento puede representar diferencias en la calidad de las dietas de las personas sin acceso a una nutrición adecuada.

La calidad y seguridad de la leche cruda de vaca puede verse perjudicada por diferentes razones, microorganismos, residuos químicos y otros contaminantes, lo que incide significativamente sobre la salud pública. La pérdida de estas condiciones de calidad y seguridad, causa importantes pérdidas económicas, de salud pública, de seguridad alimentaria, etc.

Estas implicaciones y los hallazgos realizados en situaciones puntuales, reafirman la necesidad de estudios de I+D+i que permitan conocer y manejar los niveles reales y específicos que relacionen la incidencia de los parámetros físico-químicos según la clasificación de la leche, la ubicación geográfica de los hatos productores, condiciones climáticas de las diferentes estaciones presentes en Panamá, manejo microbiológico, enfermedades infecciosas de la ubre (mastitis sub-clínica y mastitis clínica) con la presencia de células somáticas presentes en la producción de leche nacional. Esto es necesario para conocer los niveles reales de calidad de la leche cruda de vaca, de manera que las autoridades involucradas puedan tomar decisiones de acción y de normativas.

El desarrollo de estas investigaciones generará el conocimiento adecuado para impulsar, en parte, el cumplimiento de algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. A) Objetivo 1. “Fin de la pobreza”; B) Objetivo 2. “Hambre Cero”; C) Objetivo 10. “Reducción de las Desigualdades”. Lo que involucrará el fortalecimiento como país en la creación de una estructura productiva más compleja y diversificada, que permita reducir la brecha de productividad entre Panamá y países desarrollados. Todo esto, representaría un impacto considerable a las políticas del Plan Estratégico Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (PENCIYT) 2019-2024.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Universidad Tecnológica de Panamá por el apoyo logístico y de infraestructura para la elaboración de este documento. A su vez, agradece a los integrantes del Centro de Innovación y Transferencia Tecnológica de la UTP, por su apoyo constante y desinteresado.

CONFLICTO DE INTERESES

El autor declara no tener algún conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] J. M. Jay, *Microbiología moderna de los alimentos.*, 5.ª ed. Zaragoza, España.: Editorial ACRIBIA S.A., 2009.
- [2] A. Carvajal, R. Felmer, F. Mujica, M. Ortíz, B. Sagredo, y X. Valderrama, «Impacto de la biotecnología en el sector lácteo.» Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile., 2011. [En línea]. Disponible en: <https://consorciolechero.cl/chile/documentos/publicaciones/24junio/impacto-de-la-biotecnologia-en-el-sector-lacteo-potenciales-nichos-de-aplicacion-en-chile.pdf>
- [3] T. J. Britz, C. Lamprecht, y G. O. Sigge, «Dealing with Environmental Issues», en *Advanced Dairy Science and Technology*, John Wiley & Sons, Ltd, 2008, pp. 262-293. doi: 10.1002/9780470697634.ch7.
- [4] P. Walstra, J. Wouters, y T. Geurts, *Dairy Science and Technology*, Second Edition. Taylor & Francis Group, 2006. Consultado: abr. 12, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.routledge.com/Dairy-Science-and-Technology/Walstra-Walstra-Wouters-Geurts/p/book/9780824727635>
- [5] Food and Agriculture Organization of the United Nations, «Dairy production and products: Milk composition», 2013. <http://www.fao.org/dairy-production-products/products/milk-composition/en/> (accedido dic. 02, 2020).
- [6] Food and Agriculture Organization of the United Nation, «FAOSTAT statistical database.», 2020. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (accedido sep. 16, 2020).
- [7] Food and Drug Administration (FDA), «Pasteurized milk ordinance (PMO)». 2019. Consultado: dic. 21, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://www.farad.org/pasteurized-milk-ordinance.html>
- [8] A. L. Kelly y L. Bach Larsen, «1 - Milk biochemistry», en *Improving the Safety and Quality of Milk*, M. W. Griffiths, Ed. Woodhead Publishing, 2010, pp. 3-26. doi: 10.1533/9781845699420.1.3.
- [9] I. R. T. Renhe, Í. T. Perrone, G. M. Tavares, P. Schuck, y A. F. de Carvalho, «Chapter 2 - Physicochemical Characteristics of Raw Milk», en *Raw Milk*, L. A. Nero y A. F. De Carvalho, Eds. Academic Press, 2019, pp. 29-43. doi: 10.1016/B978-0-12-810530-6.00002-X.
- [10] U. Bernabucci *et al.*, «Effect of summer season on milk protein fractions in Holstein cows», *Journal of Dairy Science*, vol. 98, n.º 3, pp. 1815-1827, mar. 2015, doi: 10.3168/jds.2014-8788.
- [11] O. M. Harstad y H. Steinshamn, «9 - Cows' diet and milk composition», en *Improving the Safety and Quality of Milk*, M. W. Griffiths, Ed. Woodhead Publishing, 2010, pp. 223-245. doi: 10.1533/9781845699420.3.223.
- [12] T. Huppertz y A. L. Kelly, «Properties and Constituents of Cow's Milk», en *Milk Processing and Quality Management*, John Wiley & Sons, Ltd, 2008, pp. 23-47. doi: 10.1002/9781444301649.ch2.
- [13] J. Mukherjee, K. De, M. Chaudhury, y A. K. Dang, «Seasonal variation in in vitro immune activity of milk leukocytes in elite and non-elite crossbred cows of Indian sub-tropical semi-arid climate», *Biological Rhythm Research*, vol. 46, n.º 3, pp. 425-433, May 2015, Doi: 10.1080/09291016.2015.1020200.
- [14] M. Franzoi, G. Niero, G. Visentin, M. Penasa, M. Cassandro, y M. De Marchi, «Variation of Detailed Protein Composition of Cow Milk Predicted from a Large Database of Mid-Infrared Spectra», *Animals*, vol. 9, n.º 4, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 176, abr. 2019. Consultado: dic. 02, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-2615/9/4/176>
- [15] R. C. Laben, «Factors Responsible for Variation in Milk Composition», *Journal of Dairy Science*, vol. 46, n.º 11, pp. 1293-1301, nov. 1963, Doi: 10.3168/jds.S0022-0302(63)89264-4.
- [16] R. S. Rossi *et al.*, «Diagnostic accuracy of Somatic cell, California Mastitis Test, and microbiological examination of composite milk to detect Streptococcus agalactiae intramammary infections», *Journal of Dairy Science*, vol. 101, n.º 11, pp. 10220-10229, nov. 2018, doi: 10.3168/jds.2018-14753.
- [17] M. M. M. Vissers y F. Driehuis, «On-Farm Hygienic Milk Production», en *Milk Processing and Quality Management*, John Wiley & Sons, Ltd, 2008, pp. 1-22. doi: 10.1002/9781444301649.ch1.
- [18] L. F. S. P. Barbosa *et al.*, «Somatic cell count and type of intramammary infection impacts fertility from in vitro produced embryo transfer», *Theriogenology*, vol. 108, pp. 291-296, mar. 2018, doi: 10.1016/j.theriogenology.2017.12.025.
- [19] P. Cremonesi *et al.*, «Main Pathogens Detected in Milk», en *Reference Module in Food Science*, Elsevier, 2020. doi: 10.1016/B978-0-08-100596-5.22977-6.
- [20] K. A. Dolecheck, A. García-Guerra, y L. E. Moraes, «Quantifying the effects of mastitis on the reproductive performance of dairy cows: A meta-analysis», *Journal of Dairy Science*, vol. 102, n.º 9, pp. 8454-8477, sep. 2019, doi: 10.3168/jds.2018-15127.
- [21] United States Department of Agriculture, «Milk Quality, Milking Procedures, and Mastitis on U.S. Dairies, 2014». USDA-APHIS-VS-CEAH-NAHMS NRRC Building B, M.S. 2E7 2150 Centre Avenue Fort Collins, CO 80526-8117 970.494.7000 <http://www.aphis.usda.gov/nahms>, 2014. Consultado: ene. 04, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.aphis.usda.gov/animal_health/nahms/dairy/downloads/dairy14/Dairy14_dr_Mastitis.pdf

- [22] T. Bobbo *et al.*, «Associations between pathogen-specific cases of subclinical mastitis and milk yield, quality, protein composition, and cheese-making traits in dairy cows», *Journal of Dairy Science*, vol. 100, n.º 6, pp. 4868-4883, jun. 2017, doi: 10.3168/jds.2016-12353.
- [23] A. L. Michel y C. M. McCrindle, «An Overview of Zoonoses with Importance to the Dairy Industry», *FAO. Animal Production and Health*, p. 5, 2005, [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/y6007e/y6007e00.pdf>
- [24] L. M. Perin, J. G. Pereira, L. S. Bersot, y L. A. Nero, «Chapter 3 - The Microbiology of Raw Milk», en *Raw Milk*, L. A. Nero y A. F. De Carvalho, Eds. Academic Press, 2019, pp. 45-64. doi: 10.1016/B978-0-12-810530-6.00003-1.
- [25] T. Baars, «Chapter 4 - Regulations and Production of Raw Milk», en *Raw Milk*, L. A. Nero y A. F. De Carvalho, Eds. Academic Press, 2019, pp. 65-89. doi: 10.1016/B978-0-12-810530-6.00004-3.
- [26] J. Hamann, «10 - Mastitis and raw milk quality, safety and yield», en *Improving the Safety and Quality of Milk*, M. W. Griffiths, Ed. Woodhead Publishing, 2010, pp. 246-263. doi: 10.1533/9781845699420.3.246.
- [27] C. H. Knight, «Chapter 1 - Raw Milk Physiology», en *Raw Milk*, L. A. Nero y A. F. De Carvalho, Eds. Academic Press, 2019, pp. 1-27. doi: 10.1016/B978-0-12-810530-6.00001-8.
- [28] Comisión del Codex Alimentarius, «Código de prácticas de higiene para la leche y los productos lácteos.» CAC/RCP 57-2004. (Food and Agriculture Organization-World Health Organization, 2004. [En línea]. Disponible en: http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspac.e.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCXC%2B57-2004%252FCXC_057s.pdf
- [29] B. Bonfoh *et al.*, «Microbiological quality of cows' milk taken at different intervals from the udder to the selling point in Bamako (Mali)», *Food Control*, vol. 14, n.º 7, pp. 495-500, oct. 2003, doi: 10.1016/S0956-7135(02)00109-3.
- [30] M. Brousett-Minaya, A. Torres, A. Chambi, B. Mamani, y H. Gutiérrez, «Calidad fisicoquímica, microbiológica y toxicológica de leche cruda en las cuencas ganaderas de la región Puno-Perú», *Scientia Agropecuaria*, vol. 6, n.º 3, Art. n.º 3, sep. 2015, doi: 10.17268/sci.agropecu.2015.03.03.
- [31] T. de Graaf, J. J. Romero Zuñiga, M. Caballero, y R. H. Dwingler, «Microbiological quality aspects of cow's milk at a smallholder cooperative in Turrialba, Costa Rica.», *Revue d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*, vol. 50, n.º 1, pp. 57-64, 1997, Accedido: feb. 05, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19970403794>
- [32] Y. Ma, C. Ryan, D. M. Barbano, D. M. Galton, M. A. Rudan, y K. J. Boor, «Effects of Somatic Cell Count on Quality and Shelf-Life of Pasteurized Fluid Milk», *Journal of Dairy Science*, vol. 83, n.º 2, pp. 264-274, feb. 2000, Doi: 10.3168/jds.S0022-0302(00)74873-9.
- [33] E. Swai y L. Schoonman, «Microbial quality and associated health risks of raw milk marketed in the Tanga region of Tanzania», *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, vol. 1, n.º 3, pp. 217-222, jun. 2011, doi: 10.1016/S2221-1691(11)60030-0.
- [34] M. J. Paape, B. Poutrel, A. Contreras, J. C. Marco, y A. V. Capuco, «Milk Somatic Cells and Lactation in Small Ruminants», *Journal of Dairy Science*, vol. 84, pp. E237-E244, jun. 2001, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(01)70223-8.
- [35] P. D. Constable, K. W. Hinchcliff, S. H. Done, y W. Grünberg, Eds., «20 - Diseases of the Mammary Gland», en *Veterinary Medicine (Eleventh Edition)*, W.B. Saunders, 2017, pp. 1904-2001. doi: 10.1016/B978-0-7020-5246-0.00020-6.
- [36] K. J. Hand, A. Godkin, y D. F. Kelton, «Milk production and somatic cell counts: A cow-level analysis», *Journal of Dairy Science*, vol. 95, n.º 3, pp. 1358-1362, mar. 2012, doi: 10.3168/jds.2011-4927.
- [37] T. Halasa, M. Nielsen, R. B. M. Huirne, y H. Hogeveen, «Stochastic bio-economic model of bovine intramammary infection», *Livestock Science*, vol. 124, n.º 1, pp. 295-305, sep. 2009, doi: 10.1016/j.livsci.2009.02.019.
- [38] A. Napoli, D. Aiello, L. Di Donna, H. Prendushi, y G. Sindona, «Exploitation of Endogenous Protease Activity in Raw Mastitic Milk by MALDI-TOF/TOF», *Anal. Chem.*, vol. 79, n.º 15, pp. 5941-5948, ago. 2007, doi: 10.1021/ac0704863.
- [39] P. Ruegg, «Premiums, Production and Pails of Discarded Milk How Much Money Does Mastitis Cost You?», p. 7, 2005.
- [40] N. Singh y S. Anand, «Analytical Methods | Microbiological☆», en *Reference Module in Food Science*, Elsevier, 2020. doi: 10.1016/B978-0-08-100596-5.23005-9.
- [41] D. M. Barbano, Y. Ma, y M. V. Santos, «Influence of Raw Milk Quality on Fluid Milk Shelf Life^{1,2}», *Journal of Dairy Science*, vol. 89, pp. E15-E19, mar. 2006, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(06)72360-8.
- [42] S. Geisslitz y K. A. Scherf, «1.50 - Proteomics in Food Quality», en *Comprehensive Foodomics*, A. Cifuentes, Ed. Oxford: Elsevier, 2021, pp. 699-717. doi: 10.1016/B978-0-08-100596-5.22762-5.
- [43] A. Gunay y U. Gunay, «Effects of Clinical Mastitis on Reproductive Performance in Holstein Cows», *Acta Vet. Brno*, vol. 77, n.º 4, pp. 555-560, 2008, doi: 10.2754/avb200877040555.
- [44] C. J. Hogarth, J. L. Fitzpatrick, A. M. Nolan, F. J. Young, A. Pitt, y P. D. Eckersall, «Differential protein composition of bovine whey: A comparison of whey from healthy animals and from those with clinical mastitis», *PROTEOMICS*, vol. 4, n.º 7, pp. 2094-2100, 2004, doi: <https://doi.org/10.1002/pmic.200300723>.
- [45] P. L. Ruegg, P. Fricke, y M. J. Fuenzalida, «Impact of mastitis on reproductive performance», p. 7, 2015.
- [46] D. Wolfenson, G. Leitner, y Y. Lavon, «The Disruptive Effects of Mastitis on Reproduction and Fertility in Dairy Cows», *Italian Journal of Animal Science*, vol. 14, n.º 4, p. 4125, ene. 2015, doi: 10.4081/ijas.2015.4125.
- [47] W. Vanderhaeghen, S. Piepers, F. Leroy, E. Van Coillie, F. Haesebrouck, y S. De Vliegher, «Identification, typing, ecology and epidemiology of coagulase negative

- staphylococci associated with ruminants», *Vet J*, vol. 203, n.º 1, pp. 44-51, ene. 2015, doi: 10.1016/j.tvjl.2014.11.001.
- [48] R. A. Batavani, S. Asri, y H. Naebzadeh, «The effect of subclinical mastitis on milk composition in dairy cows», *Iranian Journal of Veterinary Research*, vol. 8, n.º 3, pp. 205-211, dic. 2007, doi: 10.22099/ijvr.2007.925.
- [49] P. L. Ruegg, «Risks, Realities and Responsibilities Associated with Mastitis Treatments, available in online: www.nmconline.org», presentado en Proc. Reg. Meeting National Mastitis Council, Ghent, Belgium, 2014. Accedido: ene. 12, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://andysci.wisc.edu/2014/08/29/cow-talk-with-an-expert-mastitis-treatments/>
- [50] M. F. Addis *et al.*, «Relationship between milk cathelicidin abundance and microbiologic culture in clinical mastitis», *Journal of Dairy Science*, vol. 100, n.º 4, pp. 2944-2953, abr. 2017, doi: 10.3168/jds.2016-12110.
- [51] A. F. Cunha *et al.*, «Comparison of antibody repertoires against *Staphylococcus aureus* in healthy and infected dairy cows with a distinct mastitis history and vaccinated with a polyvalent mastitis vaccine», *Journal of Dairy Science*, vol. 103, n.º 5, pp. 4588-4605, may 2020, doi: 10.3168/jds.2019-17084.
- [52] M. A. S. Moreira, A. S. Júnior, M. C. Lima, y S. L. da Costa, «Chapter 11 - Infectious Diseases in Dairy Cattle», en *Raw Milk*, L. A. Nero y A. F. De Carvalho, Eds. Academic Press, 2019, pp. 235-258. doi: 10.1016/B978-0-12-810530-6.00011-0.
- [53] T. Tomazi *et al.*, «Association of herd-level risk factors and incidence rate of clinical mastitis in 20 Brazilian dairy herds», *Preventive Veterinary Medicine*, vol. 161, pp. 9-18, dic. 2018, doi: 10.1016/j.prevetmed.2018.10.007.
- [54] G. Leitner, Y. Lavon, U. Merin, S. Jacoby, R. Shaked, y N. Silanokove, «Major Considerations in Managing Subclinical Mastitis During Lactation in Modern Dairy Farms | IVIS», *Israel Journal of Veterinary Medicine*, vol. 72, n.º 2, 2017, Accedido: dic. 23, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.ivis.org/library/israel-journal-of-veterinary-medicine/israel-journal-of-veterinary-medicine-vol-722-jun/major-considerations-managing-subclinical-mastitis-during-lactation-modern-dairy-farms>
- [55] P. L. Ruegg, «Improving Treatments of Subclinical Mastitis». University of WI, Dept. of Dairy Science, 2013. Accedido: dic. 23, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://milkquality.wisc.edu/whats-new/treatment-of-subclinical-mastitis/>
- [56] S. McDougall, «Bovine mastitis: epidemiology, treatment and control», *New Zealand Veterinary Journal*, vol. 50, n.º sup3, pp. 81-84, ene. 2002, doi: 10.1080/00480169.2002.36274.
- [57] M. Busanello, R. S. Rossi, L. D. Cassoli, J. C. F. Pantoja, y P. F. Machado, «Estimation of prevalence and incidence of subclinical mastitis in a large population of Brazilian dairy herds», *Journal of Dairy Science*, vol. 100, n.º 8, pp. 6545-6553, ago. 2017, doi: 10.3168/jds.2016-12042.
- [58] «Council Directive 92/46/EEC». 1992. Accedido: dic. 21, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX%3A31992L0046>
- [59] L. Martins, M. M. Barcelos, R. I. Cue, K. L. Anderson, M. V. dos Santos, y J. L. Gonçalves, «Chronic subclinical mastitis reduces milk and components yield at the cow level», *Journal of Dairy Research*, vol. 87, n.º 3, pp. 298-305, ago. 2020, doi: 10.1017/S0022029920000321.
- [60] S. Piepers, L. D. Meulemeester, A. de Kruif, G. Opsomer, H. W. Barkema, y S. D. Vliegheer, «Prevalence and distribution of mastitis pathogens in subclinically infected dairy cows in Flanders, Belgium», *Journal of Dairy Research*, vol. 74, n.º 4, pp. 478-483, nov. 2007, doi: 10.1017/S0022029907002841.
- [61] B. H. P. van den Borne, T. Halasa, G. van Schaik, H. Hogeveen, y M. Nielsen, «Bioeconomic modeling of lactational antimicrobial treatment of new bovine subclinical intramammary infections caused by contagious pathogens», *Journal of Dairy Science*, vol. 93, n.º 9, pp. 4034-4044, sep. 2010, doi: 10.3168/jds.2009-3030.
- [62] M. L. M. Cruzado-Bravo *et al.*, «Occurrence of *Arcobacter* spp. in Brazilian Minas frescal cheese and raw cow milk and its association with microbiological and physicochemical parameters», *Food Control*, vol. 109, p. 106904, mar. 2020, doi: 10.1016/j.foodcont.2019.106904.
- [63] T. Halasa, K. Huijps, O. Østerås, y H. Hogeveen, «Economic effects of bovine mastitis and mastitis management: A review», *Veterinary Quarterly*, vol. 29, n.º 1, pp. 18-31, ene. 2007, doi: 10.1080/01652176.2007.9695224.
- [64] C. S. F. Oliveira, H. Hogeveen, A. M. Botelho, P. V. Maia, S. G. Coelho, y J. P. A. Haddad, «Cow-specific risk factors for clinical mastitis in Brazilian dairy cattle», *Preventive Veterinary Medicine*, vol. 121, n.º 3, pp. 297-305, oct. 2015, doi: 10.1016/j.prevetmed.2015.08.001.
- [65] D. Schwarz, D. E. Santschi, J. Durocher, y D. M. Lefebvre, «Evaluation of the new differential somatic cell count parameter as a rapid and inexpensive supplementary tool for udder health management through regular milk recording», *Preventive Veterinary Medicine*, vol. 181, p. 105079, ago. 2020, doi: 10.1016/j.prevetmed.2020.105079.
- [66] R. N. Zadoks, H. G. Allore, T. J. Hagenaars, H. W. Barkema, y Y. H. Schukken, «A mathematical model of *Staphylococcus aureus* control in dairy herds», *Epidemiology & Infection*, vol. 129, n.º 2, pp. 397-416, oct. 2002, doi: 10.1017/S0950268802007483.
- [67] K. L. Anderson, M. T. Correa, A. Allen, y R. R. Rodriguez, «Fresh cow mastitis monitoring on day 3 postpartum and its relationship to subsequent milk production», *Journal of Dairy Science*, vol. 93, n.º 12, pp. 5673-5683, dic. 2010, doi: 10.3168/jds.2009-2885.
- [68] M. J. Auldust, «Milk Quality and Udder Health | Effect on Processing Characteristics», en *Reference Module in Food Science*, Elsevier, 2020. doi: 10.1016/B978-0-12-818766-1.00003-9.
- [69] A. L. Bhutto, R. D. Murray, y Z. Woldehiwet, «California mastitis test scores as indicators of subclinical intramammary infections at the end of lactation in dairy cows»,

- Research in Veterinary Science*, vol. 92, n.º 1, pp. 13-17, feb. 2012, doi: 10.1016/j.rvsc.2010.10.006.
- [70] C. Böhnlein, G. Fiedler, J. Loop, C. M. A. P. Franz, y J. Kabisch, «Microbiological quality and safety of raw milk from direct sale in northern Germany», *International Dairy Journal*, p. 104944, dic. 2020, doi: 10.1016/j.idairyj.2020.104944.
- [71] J. L. Gonçalves *et al.*, «Bovine subclinical mastitis reduces milk yield and economic return», *Livestock Science*, vol. 210, pp. 25-32, abr. 2018, doi: 10.1016/j.livsci.2018.01.016.
- [72] H. Hogeveen, K. Huijps, y T. Lam, «Economic aspects of mastitis: New developments», *New Zealand Veterinary Journal*, vol. 59, n.º 1, pp. 16-23, ene. 2011, doi: 10.1080/00480169.2011.547165.
- [73] J. Katholm, T. W. Bennedsgaard, M. T. Koskinen, y E. Rattenborg, «Quality of bulk tank milk samples from Danish dairy herds based on real-time polymerase chain reaction identification of mastitis pathogens», *Journal of Dairy Science*, vol. 95, n.º 10, pp. 5702-5708, oct. 2012, doi: 10.3168/jds.2011-5307.
- [74] Y. Kuang *et al.*, «Characterization of bacterial population of raw milk from bovine mastitis by culture-independent PCR–DGGE method», *Biochemical Engineering Journal*, vol. 45, n.º 1, pp. 76-81, jun. 2009, doi: 10.1016/j.bej.2009.02.010.
- [75] E. Lozada-Soto, C. Maltecca, K. Anderson, y F. Tiezzi, «Analysis of milk leukocyte differential measures for use in management practices for decreased mastitis incidence», *Journal of Dairy Science*, vol. 103, n.º 1, pp. 572-582, ene. 2020, doi: 10.3168/jds.2019-16355.
- [76] J. B. Ndahetuye *et al.*, «A cross sectional study of prevalence and risk factors associated with subclinical mastitis and intramammary infections, in dairy herds linked to milk collection centers in Rwanda», *Preventive Veterinary Medicine*, vol. 179, p. 105007, jun. 2020, doi: 10.1016/j.prevetmed.2020.105007.
- [77] C. Syring *et al.*, «Bovine mastitis: The diagnostic properties of a PCR-based assay to monitor the *Staphylococcus aureus* genotype B status of a herd, using bulk tank milk», *Journal of Dairy Science*, vol. 95, n.º 7, pp. 3674-3682, jul. 2012, doi: 10.3168/jds.2011-4968.
- [78] T. Tomazi, J. L. Gonçalves, J. R. Barreiro, M. A. Arcari, y M. V. dos Santos, «Bovine subclinical intramammary infection caused by coagulase-negative staphylococci increases somatic cell count but has no effect on milk yield or composition», *Journal of Dairy Science*, vol. 98, n.º 5, pp. 3071-3078, may 2015, doi: 10.3168/jds.2014-8466.
- [79] L. Zhang, S. Boeren, A. C. M. van Hooijdonk, J. M. Vervoort, y K. A. Hetingga, «A proteomic perspective on the changes in milk proteins due to high somatic cell count», *Journal of Dairy Science*, vol. 98, n.º 8, pp. 5339-5351, ago. 2015, doi: 10.3168/jds.2014-9279.
- [80] M. N. Alhussien y A. K. Dang, «Milk somatic cells, factors influencing their release, future prospects, and practical utility in dairy animals: An overview», *Vet World*, vol. 11, n.º 5, pp. 562-577, May 2018, Doi: 10.14202/vetworld.2018.562-577.
- [81] M. Alhussien, M. Kaur, P. Manjari, S. P. Kimothi, A. K. Mohanty, y A. K. Dang, «A comparative study on the blood and milk cell counts of healthy, subclinical, and clinical mastitis Karan Fries cows», *Vet World*, vol. 8, n.º 5, pp. 685-689, May 2015, Doi: 10.14202/vetworld.2015.685-689.
- [82] M. E. Alnakip, «The Immunology of Mammary Gland of Dairy Ruminants between Healthy and Inflammatory Conditions», *Journal of Veterinary Medicine*, vol. 2014, pp. 1-31, 2014, Accedido: ene. 16, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.hindawi.com/journals/jvm/2014/659801/>
- [83] D. K. Swain, M. S. Kushwah, M. Kaur, y A. K. Dang, «Neutrophil dynamics in the blood and milk of crossbred cows naturally infected with *Staphylococcus aureus*», *Vet World*, vol. 8, n.º 3, pp. 336-345, mar. 2015, doi: 10.14202/vetworld.2015.336-345.
- [84] M. Damm, C. Holm, M. Blaabjerg, M. N. Bro, y D. Schwarz, «Differential somatic cell count—A novel method for routine mastitis screening in the frame of Dairy Herd Improvement testing programs», *Journal of Dairy Science*, vol. 100, n.º 6, pp. 4926-4940, jun. 2017, doi: 10.3168/jds.2016-12409.
- [85] G. T. Fosgate, I. M. Petzer, y J. Karzis, «Sensitivity and specificity of a hand-held milk electrical conductivity meter compared to the California mastitis test for mastitis in dairy cattle», *The Veterinary Journal*, vol. 196, n.º 1, pp. 98-102, abr. 2013, doi: 10.1016/j.tvjl.2012.07.026.
- [86] H. Lomander, C. Svensson, C. Hallén-Sandgren, H. Gustafsson, y J. Frössling, «Associations between decreased fertility and management factors, claw health, and somatic cell count in Swedish dairy cows», *Journal of Dairy Science*, vol. 96, n.º 10, pp. 6315-6323, oct. 2013, doi: 10.3168/jds.2012-6475.
- [87] J. C. McNally, M. A. Crowe, J. F. Roche, y M. E. Beltman, «Effects of physiological and/or disease status on the response of postpartum dairy cows to synchronization of estrus using an intravaginal progesterone device», *Theriogenology*, vol. 82, n.º 9, pp. 1263-1272, dic. 2014, doi: 10.1016/j.theriogenology.2014.08.006.
- [88] F. C. Thomas, T. Geraghty, P. B. A. Simões, F. M. Mshelbwala, H. Haining, y P. D. Eckersall, «A pilot study of acute phase proteins as indicators of bovine mastitis caused by different pathogens», *Research in Veterinary Science*, vol. 119, pp. 176-181, ago. 2018, doi: 10.1016/j.rvsc.2018.06.015.
- [89] M. J. Fuenzalida, P. M. Fricke, y P. L. Ruegg, «The association between occurrence and severity of subclinical and clinical mastitis on pregnancies per artificial insemination at first service of Holstein cows», *Journal of Dairy Science*, vol. 98, n.º 6, pp. 3791-3805, jun. 2015, doi: 10.3168/jds.2014-8997.
- [90] Y. Lavon, E. Ezra, G. Leitner, y D. Wolfenson, «Association of conception rate with pattern and level of somatic cell count elevation relative to time of insemination in dairy cows», *Journal of Dairy Science*, vol. 94, n.º 9, pp. 4538-4545, sep. 2011, doi: 10.3168/jds.2011-4293.
- [91] R. G. M. Olde Riekerink, H. W. Barkema, y H. Stryhn, «The Effect of Season on Somatic Cell Count and the Incidence

- of Clinical Mastitis», *Journal of Dairy Science*, vol. 90, n.º 4, pp. 1704-1715, abr. 2007, doi: 10.3168/jds.2006-567.
- [92] Comunidad Andina, «Leche Cruda. NA0063:2009». Comunidad Andina, 2009.
- [93] East African Community, «Eat African Standard. Raw cow milk-Specification». 2006.
- [94] European Economic Community, «Council directive 92/46/EEC. Commission Document 392L0046.» 1992. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A31992L0046>
- [95] Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos, «Industria lechera-Sistema integrado de gestión de la lechería Argentina. E 229/16- SAGyP.» Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2016.
- [96] Instituto Nacional de Estadística y Censo, «Estimación de la producción de leche de vaca en la república», 2020. <https://www.inec.gob.pa/archivos/P7421312-13.pdf> (accedido dic. 02, 2020).
- [97] Asamblea Nacional, «Decreto de Gabinete 229 del 16 de julio de 1969.» Gaceta Oficial del Estado 16,537 del 4 de febrero de 1970, 1969. [En línea]. Disponible en: <https://docs.panama.justia.com/federales/decretos-de-gabinete/decreto-de-gabinete-229-de-1969-feb-4-1970.pdf>
- [98] «Cadena Agroalimentaria de Leche. Panamá». <https://mida.gob.pa>, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://mida.gob.pa>
- [99] D. Berroa, «Informe Final de la Consultoría Sobre la Calidad de la Leche Producida en Panamá a Nivel de Fincas y de Acuerdo a las Normativas Vigentes, en Contraste con las Condiciones de Infraestructura y Manejo del Ganado», TCP/PAN/3402, 2015.
- [100] C. Gómez, M. Tarté, U. Barría, H. Hernández, C. Rengifo Herrera, y E. Pile, «Mastitis subclínica en explotaciones lecheras del distrito de La Chorrera, Panamá.», *Scientia*, vol. 26, n.º 2, pp. 37-44, 2017.
- [101] A. Chang, E. Pile, E. Delgado, y I. Domínguez, «Mastitis entre animales procedentes de fincas productoras de leche grado c en Tortí y algunos corregimientos de Darién, Panamá.», *Revista Saberes APUDEP*, vol. 2, n.º 1, pp. 80-88, 2019. Accedido: ene. 17, 2021. [En línea]. Disponible en: https://revistas.up.ac.pa/index.php/saberes_apudep/article/view/877
- [102] P. Montero-Prado, G. A. Ruiz Morales, y A. Fosatti Carrillo, «Physicochemical characterization and correlation of raw cow's milk according to classification assigned in Panama», *Agronomía Mesoamericana*, vol. 32, n.º 3, pp. 939-948, 2021, doi: 10.15517/am.v32i3.45471.

Diseño bioinspirado en la palma de coco de Panamá para estructuras de absorción de energía

Panama coconut palm bio-inspired design for energy absorption structures

Nacari Marín ^{2*} , Estephany Reyes ¹ , Kui Wang ¹ , Noé Serrano ³ 

¹ Central South University, School of Traffic and Transportation Engineering, China

² Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Mecánica, Panamá

³ Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil, Panamá

nacari.marin@utp.ac.pa; estephany.reyes@utp.ac.pa, kui.wang@csu.edu.cn, noe.serrano@utp.ac.pa

Fecha de recepción: 28 de febrero de 2021; Fecha de aprobación: 10 de marzo de 2022.

*Autor de correspondencia: Nacari Marín (nacari.marin@utp.ac.pa)

RESUMEN. El diseño bioinspirado se desarrolla conscientemente a través de la investigación, el estudio y el análisis de como los organismos vivos han desarrollado soluciones, superado los retos del mundo natural. De este modo, el campo de los materiales bioinspirados contribuye al diseño de estructuras y a la fabricación de materiales, con el objetivo de combinar estructuras naturales conocidas con un material específico. El objetivo principal de esta investigación es inspirarse en la vegetación de Panamá y América, para identificar, interpretar, extraer, diseñar, verificar y optimizar una estructura para aplicaciones de absorción de energía. En el presente documento se resumen conceptos sobre la bioinspiración, las características comunes en los materiales biológicos según diversos autores en conjunto con diseños de estructuras de pared delgada. Las estructuras, propiedades y anatomía de la palma de coco (Cocos nucifera) son estudiadas como parte de la inspiración, siendo estas plantas parte de la vegetación de Panamá. También se expone el método de bioinspiración y la ruta técnica, que corresponden a la búsqueda de estrategias biológicas en las plantas para gestionar las fuerzas estructurales, análisis de propiedades mecánicas y de las características estructurales de la palma. De esta manera surgen diseños tendientes a la optimización de elementos estructurales, tal y como es el caso de los tubos cilíndricos, mediante métodos de análisis experimental y numérico, los que se pueden llevar a cabo para conocer las ventajas, desventajas y la eficiencia de nuevos diseños.

Palabras clave. *Absorción de energía, diseño bioinspirado, estructura de palma de coco, haces vasculares, optimización estructural.*

ABSTRACT. Bio-inspired design is consciously developed through research, study and analysis of how living organisms have developed solutions to overcome the challenges of the natural world. In this way, the field of bio-inspired materials contributes to the design of structures and the manufacture of materials, with the aim of combining known natural structures with a specific material. The main objective of this research is to be inspired by the vegetation of Panama and America, to identify, interpret, extract, design, verify and optimize a structure for energy absorption applications. This paper summarizes concepts about bioinspiration, common characteristics in biological materials according to several authors in conjunction with designs of thin-walled structures. The structures, properties and anatomy of the coconut palm (Cocos nucifera) are studied as part of the inspiration, being these plants part of the vegetation of Panama. The bioinspiration method and the technical route are also presented, which correspond to the search for biological strategies in plants to manage structural forces, analysis of mechanical properties and structural characteristics of the palm. In this way, designs tending to the optimization of structural elements, such as the case of cylindrical tubes, emerge through experimental and numerical analysis methods, which can be carried out to know the advantages, disadvantages and efficiency of new designs.

Keywords. *Energy absorption, bioinspired design, coconut palm structure, vascular bundles, structural optimization.*

1. Introducción

La naturaleza es una fuente inagotable de inspiración para encontrar soluciones funcionales, sostenibles e

innovadoras a problemas concretos planteados por el ser humano. Nuestro planeta alberga vida desde hace miles de millones de años y son muchos los organismos y seres vivos que han evolucionado para vivir según sus necesidades y las condiciones de su entorno. Es a partir del diseño bioinspirado, que se desarrollan conscientemente soluciones a través de la investigación científica, por ejemplo, como los organismos vivos a través de la multiplicidad de formas, materiales y mecanismos compuestos por células, sustancias, tejidos, órganos y sistemas integrados, han desarrollado soluciones y superado los retos del mundo natural [1–3].

El gran número de estudios o diseños bioinspirados en animales, plantas, semillas, organismos naturales, entre otras estructuras, se evidencian en investigaciones alrededor del mundo [4–9]. Hashemi Farzaneh [2], Pereira *et al.* [10] y Tripathi [11] concluyen en sus estudios que todavía hay una variedad de materiales, plantas y componentes del entorno natural que pueden servir de inspiración para la creación de productos necesarios y así innovar en el campo de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales.

El estudio de las propiedades de los materiales se realiza en el ámbito de la investigación y la industria, como herramienta para obtener las ventajas del material y para buscar las aplicaciones potenciales [12]. De este modo, el campo de los materiales bioinspirados contribuye al diseño de estructuras y a la fabricación de materiales, con el objetivo de combinar estructuras naturales conocidas con un material específico. No cabe duda de que la demanda de estructuras y materiales con mejores propiedades mecánicas se encuentra en aumento, así como la combinación de materiales que proporcionan un rendimiento adaptado para mejorar la resistencia a los golpes y la amortiguación interna. Ejemplo de ello son los polímeros reforzados y aleaciones entre aluminio, titanio y magnesio, de los que se obtienen materiales resistentes y ligeros al mismo tiempo [13].

Las áreas de aplicación de los materiales bioinspirados son múltiples como se mencionan en [6], [14], [15]. Específicamente, las estructuras con capacidad de absorción de energía se utilizan en la industria automotriz, naval, aeroespacial, construcción, defensa y protección personal y deportiva. Materiales bioinspirados aplicados al sistema de transporte pueden

resultar interesantes en el diseño de estructuras para mejorar el rendimiento y la seguridad de los trenes de alta velocidad, al igual que de los automóviles.

El objetivo principal de esta investigación es inspirarse en la vegetación de Panamá y del continente americano para identificar, interpretar, extraer, diseñar, verificar y optimizar una estructura para aplicaciones de absorción de energía. Esto es posible gracias a las condiciones climáticas y topográficas propias de la región, que dan vida a una diversidad de plantas y semillas [16], [17].

La sección 2 proporciona conceptos sobre la bioinspiración y las características comunes en los materiales biológicos según estudios realizados por diferentes autores. La sección 3 presenta un resumen de investigaciones que utilizan la bioinspiración en el diseño de estructuras de pared delgada. Esta investigación se centra en el diseño bioinspirado del tallo de la palma de coco (*Cocos nucifera*), siendo esta una planta característica de la vegetación en Panamá y la zona tropical de América. La sección 4, explica como fue desarrollado el diseño bioinspirado a partir de las características estructurales de la palma de coco. Finalmente, se hacen recomendaciones del camino a seguir para el análisis de las propiedades mecánicas de estructuras bioinspiradas.

2. Conceptos básicos y terminología

Existen varios términos relacionados con el enfoque de diseño que se realiza mediante el uso de conceptos observados en la naturaleza, como son las características de la estructura jerárquica y compuesta. Muchos otros términos utilizan el prefijo “bio-”, pero “bio-inspirado” es generalmente aceptado como un término para los enfoques de diseño que indican las raíces biológicas de una idea [1].

Hashemi Farzaneh [2] define el diseño bioinspirado como aquel que “*tiene como objetivo la abstracción, la transferencia y la aplicación de los conocimientos adquiridos a partir de modelos biológicos*”. Según Bernett [18], las metodologías bioinspiradas pueden presentar diferentes formas, dependiendo de la persona que intenta desarrollar soluciones impactantes a problemas específicos, a partir de enfoques innovadores, útiles, sostenibles y disruptivos.

Es importante tener en cuenta que al momento de realizar un diseño bioinspirado han surgido con la práctica dos enfoques de diseño y cada uno tiene

características y metodologías diferentes [19]. El primero, es el diseño bioinspirado basado en el problema, en el que se busca la solución en la naturaleza a un problema previamente identificado. El segundo enfoque es una solución basada en el diseño bioinspirado, en el que sólo se estudia el material biológico. En esta investigación se aplica un diseño bioinspirado basado en problemas, que tiene los siguientes pasos: definición del problema, replanteamiento del problema, búsqueda de la solución biológica, definición de la solución biológica, extracción del principio y aplicación del principio [20]. Es en el campo de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales donde tiene un mayor impacto [10], [19].

En Naleway *et al.* [21] se identificaron ocho elementos estructurales comunes en los materiales biológicos, estudiados en la bioinspiración. Estos materiales son fibroso, helicoidal, gradiente, estratificado, tubular, celular, sutura y superposición. El presente estudio se basa en la estructura del tipo tubular.

2.1. Resumen de características y diseños para absorción de energía

En el estudio que se llevó a cabo por Lazarus *et al.* [14], se presenta un resumen de las características generales de los materiales biológicos como jerárquicas, compuestas, porosas y de interfaz. Por otra parte, también se presentan las arquitecturas específicas que se encuentran en los materiales biológicos resistentes a los impactos: son estratificación, gradiente, tubular, sándwich y sutura. Dicha investigación explica que muchos de los materiales de tipo tubular encontrados en la naturaleza mejoran la resistencia al impacto debido a los mecanismos típicos de deformación plástica y desviación de grietas.

En Ha & Lu [6], se categorizaron las estructuras para la absorción de energía como estructuras bioinspiradas de pared delgada, placas, estructuras celulares, estructuras civiles y otras estructuras. Dentro de esta categorización, el interés de esta investigación se centra en las estructuras bioinspiradas de pared delgada, subdivididas como bioinspiradas: tubos rectos y tubos cónicos.

Siendo el campo de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales importante para el sector industrial, hay un mayor desarrollo de investigaciones que incluyen los biomateriales inspirados en estructuras o sistemas biológicos aplicados a la absorción de energía [6]. Desde la primera aplicación del enfoque bioinspirado en el año

2000, es notable el aumento del número de publicaciones científicas en los últimos años.

La capacidad de absorción de energía de los materiales ligeros es una propiedad mecánica demandada por la industria. Entre las estructuras que han servido de bioinspiración se encuentran: la madera, el nácar, los huesos de las alas de las aves, el bambú, las plantas conocidas como cola de caballo y cola de gato, la palma, el ala del escarabajo, el hueso y el tendón, las algas diatomeas, el cuerno de buey, el balanus, la raíz de loto, el caparazón de tortuga, el camarón mantis, la cabeza y el pico del pájaro carpintero, la madera de palmito, entre muchas otras estructuras [6], [10], [30–33], [22–29].

3. Estado de la investigación y tendencias

3.1. Tubos cilíndricos

Las investigaciones científicas consultadas coinciden en que los tubos cilíndricos en comparación con otros elementos estructurales de diversas formas de sección transversal demuestran una mejor absorción de energía, debido a su rigidez, resistencia, versatilidad, bajo coste de fabricación y facilidad de manufactura. Por lo tanto, analizando el mecanismo de resistencia, rigidez y absorción de energía en las estructuras biológicas, se puede mejorar la eficacia y capacidad de este tipo de estructuras para la absorción de energía.

Ha & Lu [6], presentan un completo resumen de diversas investigaciones que utilizan la bioinspiración en el diseño de estructuras de pared delgada, clasificándolas en tubos circulares, tubos multicelulares (mejor conocido en inglés como “*multi-cell tubes*”), tubos de esquinas múltiples y tubos corrugados. En la clasificación de los tubos circulares, presentan dos diseños bioinspirados en la estructura del nácar y la madera que modifican las paredes de los tubos a través de estructuras de corte de capas helicoidales y que imitan el nácar, así como fibras helicoidales, bordeadas por capas interiores y exteriores [34], [35]. En esta investigación también se menciona un estudio que demuestra lo efectivos que son los diseños que modifican la estructura interna del tubo con puntales y crestas, poniendo como ejemplo la bioinspiración en los huesos de las alas de las aves.

Investigaciones recientes han introducido el concepto de secciones multicelulares en tubos cilíndricos, configuración que describe una sección transversal con divisiones. Algunas bioinspiraciones basadas en este

concepto son el bambú, las plantas conocidas como cola de caballo y cola de gato, la palma, el ala del escarabajo, el hueso y el tendón.

El bambú es un material biológico ligero y resistente, muy popular por sus propiedades físicas y mecánicas, que ha sido utilizado por el hombre como elemento estructural o de diseño desde la antigüedad. Sus características estructurales han dado lugar a numerosos diseños con alta capacidad de absorción de energía, entre los diseños probados numéricamente se encuentra el de Zou *et al.* [36], en donde se modificó la sección transversal de un tubo con elementos biónicos inspirados en la estructura vascular del bambú y su distribución de gradiente. En Feng *et al.* [37], se realizaron simulaciones con un diseño de tres tipos de elementos biónicos, pero como la forma era un poco compleja, se propuso el uso de un elemento biónico triangular. Esto llevó a otra investigación para optimizar el diseño y obtener una mejor absorción de energía con elementos biónicos en forma de “X”. Otra característica aplicada por [38], incluyó la mimetización con la distribución no uniforme de los haces vasculares del bambú y a través de los resultados numéricos, se obtuvo un aumento de la capacidad de carga.

Las investigaciones experimentales en tubos inspirados en el bambú son menores, porque el proceso de fabricación puede ser un poco difícil dependiendo del diseño. En Chen *et al.* [39] se muestra un diseño biónico de una sección transversal de tubo que se simplifica a una pared delgada, inspirada en tres tipos de características extraídas del bambú: nervadura de refuerzo biónica, espesor variable biónico y sección transversal biónica. En Hu *et al.* [40] se fabricó una estructura anidada tubular biónica en forma de panal de abeja utilizando diferentes diseños de la estructura del haz vascular del bambú. Todos los diseños mencionados demostraron que el método biomimético mejora del rendimiento de absorción de energía.

En investigaciones realizadas por Yin *et al.* [41], la planta llamada cola de caballo, que tiene una estructura multicelular similar al bambú, fue evaluada resultando en seis diseños de tubos bioinspirados. En este estudio se modificó la sección transversal, se modelaron y simularon numéricamente en condiciones de carga lateral. Después de observar los buenos resultados en la

resistencia al choque de estos diseños, se introdujo espuma como parte de la optimización. Lo que demostró buenos resultados bajo carga lateral, sin embargo, a pesar de los resultados obtenidos, no se entendió completamente el comportamiento de este tipo de tubos bioinspirados bajo carga axial [42]. Xiao *et al.* [43] continuó con el estudio de Yin *et al.* [41], optimizando los mismos seis diseños bajo cargas dinámicas axiales, demostrando que entre más celdas están presentes en los tubos bioinspirados, mayor es la absorción específica de energía.

Las propiedades mecánicas de las hojas de cola de gato se estudiaron en [44]. En base al estudio anterior, Xu *et al.* [45] propuso un parachoques biónico con una viga transversal inspirada en la estructura de las nervaduras internas de la hoja de cola de gato y una caja de choque que imita la estructura del bambú. Ese diseño biónico mostró un efecto significativo en la resistencia al choque de la estructura y mejoró la absorción de energía específica.

En otro estudio, los tallos de la palmera sirvieron de inspiración para investigar la absorción de energía de los tubos cuadrados bajo aplastamiento axial cuasi-estático, analizando experimentalmente los diseños con forma de estructura multicelular y distribución de los haces vasculares de la palmera. Las características de resistencia al choque de los tubos se vieron significativamente afectadas por el número de celdas, en comparación con los tubos de una sola celda [46].

Existen diferentes investigaciones bioinspiradas centradas en el estudio de la estructura de las alas delanteras de los escarabajos, cuyos resultados demostraron que la estructura bioinspirada presenta una absorción de energía específica mejorada en comparación con la estructura convencional. Xiang & Du [47] presentaron dos tubos multicelulares bioinspirados consistentes en las celdas del panal de abejas y tubos circulares colocados en el centro de las celdas o en las paredes de las mismas. A continuación, Hao & Du [48] estudiaron las paredes de las celdas como estructura convencional en comparación con tres diseños con diferentes posiciones de los tubos circulares en las paredes de las celdas. Otro estudio, inspirado en los absorbentes de energía bitubulares y en la estructura interna del ala del escarabajo dama dio paso a diseños de

tubos circulares en estructuras cilíndricas huecas con varias secciones transversales poligonales. Estos diseños mostraron que la absorción de energía de la estructura se encuentra directamente relacionada con el grosor de la pared interna y las configuraciones de la sección transversal [47]. Este estudio fue sintetizado por [49], al analizar diseños bioinspirados multicelulares con secciones cuadrilaterales, hexagonales y octogonales para conocer el efecto de la posición del tubo circular y la forma de la sección transversal. Otro estudio fue realizado por [50], para conocer el efecto de la corrugación en el comportamiento de aplastamiento de los tubos multicelulares bioinspirados. Por último, en [51] se estudiaron diseños con sub círculos autosimilares en las uniones de las nervaduras primarias mostrando una mejor resistencia al aplastamiento en comparación con los tubos circulares jerarquizados.

Finalmente, la última bioinspiración que incluye secciones multicelulares se basa en huesos y tendones de animales o humanos. Una caja de choque que imita la estructura ósea esponjosa de la tibia humana mostró una absorción de energía superior a la caja de choque original según la simulación en el estudio de [52]. Otro diseño de tubos que empaquetan tubos más pequeños en un tubo de un nivel jerárquico superior fue propuesto por [53], inspirado en la micro a nano arquitectura del tendón y el músculo, ese estudio mejoró la capacidad de absorción de energía de impacto con la jerarquía.

Dentro de los tubos bioinspirados de esquinas múltiples, se desarrolló un diseño en [54], para mejorar la absorción de energía de las columnas de paredes delgadas de esquinas múltiples no convexas, que tienen una mayor absorción de energía en comparación con las columnas cuadradas tradicionales. Este diseño imitaba los nodos de bambú y los diafragmas nodales añadiendo mamparas en la columna para mejorar la propiedad de absorción de energía. Comprobaron que, para lograr la mayor absorción de energía específica, había que añadir el menor número de mamparas en un pilar para mantener el modo de deformación progresiva.

La última subdivisión mencionada por [6], se trata de tubos corrugados bioinspirados que pueden tener patrones superficiales sinusoidales y corrugados. Un diseño inspirado en el perfil de la palma de coco fue desarrollado en [55], denominado “tubo corrugado

cónico”. Otro diseño fue desarrollado en [56], inspirado en la estructura de una diatomea que presentaba tres ondulaciones con diferentes alturas. Ambos diseños demostraron buenos resultados en comparación con su contraparte técnica.

En la figura 1 se resume el rendimiento, la eficiencia y los diseños de las estructuras bioinspiradas mencionadas anteriormente.

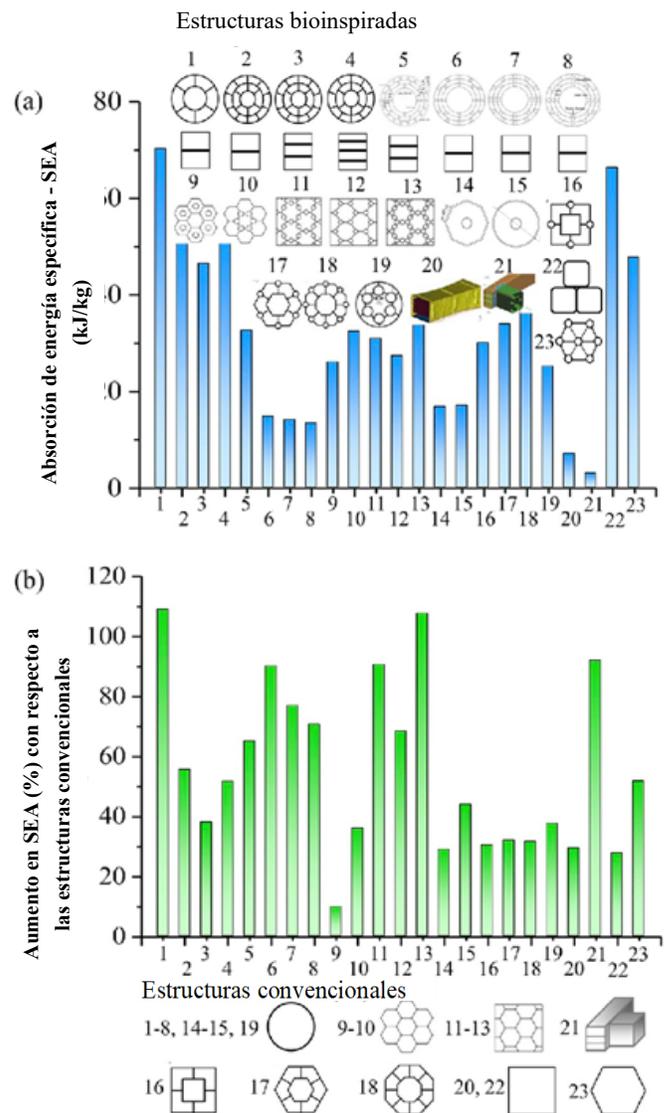


Figura 1. Rendimiento, eficiencia y diseños de las estructuras bioinspiradas [6].

3.2. Palma de coco (*Cocos nucifera*)

La inspiración de esta investigación es el tallo de la palma de coco (*Cocos nucifera*). Fathi [57] realizó un estudio para investigar la relación de la estructura y las propiedades mecánicas/físicas de la madera de la palma de coco, palmeras aceiteras y palmeras datileras. La palma de coco es muy común en todo el territorio panameño, de allí que se ha seleccionado esta planta para un diseño bioinspirado. La figura 2 muestra dos palmas de coco características de Panamá.



Figura 2. Palmas de coco [58].

3.3. La palma de coco en Panamá y América

La palma de coco forma parte de la vegetación costera característica de los trópicos y se encuentra en las costas del continente americano. En el cultivo de la palma de coco es una práctica universal nombrar las formas más comunes de una región por la localidad donde se ha recolectado. Es por ello por lo que en la literatura podemos encontrar que “*Panamá Tall*” es una de las variedades locales.

En [59], se presentó un registro histórico, genético, arqueológico e información lingüística relacionada con el origen de la palma de coco a lo largo de la costa del Pacífico de Panamá. Las hipótesis son múltiples, desde las que afirman que la palma de coco se originó en

América hasta las que mencionan que los cocos flotaron a través del océano pacífico o fueron transportados en canoas desde Filipinas o islas del Pacífico. El estudio concluye mencionando que existe una relación entre las variedades modernas de coco de la costa del Pacífico de Panamá y las variedades filipinas modernas conocidas de acuerdo con la evidencia genética. Otros estudios sugieren que los cocos de Panamá fueron introducidos después de la conquista española en las costas del Pacífico de América, probablemente provenientes de la costa del Pacífico de México, poco después de que se establecieron las primeras plantaciones mexicanas con variedades filipinas de coco.

Nayar [60], en su libro sobre la palma de coco, menciona detalles que no son claros sobre la presencia de esta palma en América. Sin embargo, observaciones de diferentes autores coinciden que la presencia de las palmas de coco en América es anterior a la llegada de Colón en 1497. Pero el momento de la llegada de los primeros cocos desde Filipinas no está claro.

3.4. Anatomía y propiedades de la palma de coco

La palma de coco forma parte de la familia de las palmeras, que cuenta con numerosas especies de plantas monocotiledóneas. Debido a esta característica, el tallo crece verticalmente sin ramificaciones. La sección transversal del tallo tiene una forma circular en la que se observan haces vasculares dispersos por toda la superficie con un gradiente de distribución (ver figura 3a). La figura 3 hace referencia al tallo de la palma de coco y el gradiente de distribución de los haces vasculares.

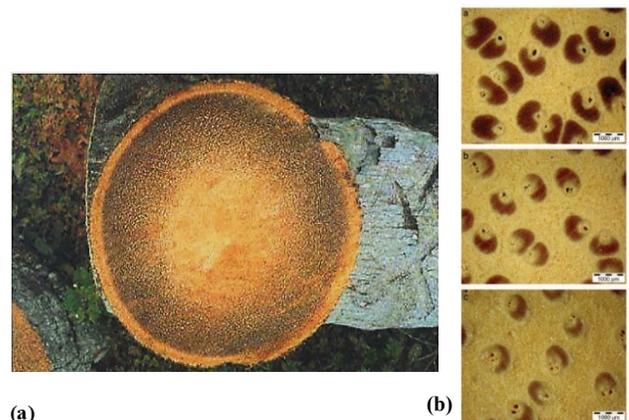


Figura 3. (a) Tallo de la palma de coco [57]. (b) Secciones macroscópicas del tallo [61].

Esta palmera se encuentra en las regiones tropicales del Mar Caribe, el Océano Índico y el Océano Pacífico. También es un icono de la cultura del trópico en Panamá por su importancia para la subsistencia de los nativos americanos [60]. Esta palma se ha utilizado durante miles de años y tiene muchos usos en todo el mundo, entre los que se encuentran la industria del combustible, los cosméticos, los alimentos y la construcción. La palma de coco tarda muchos años en crecer hasta alcanzar los 30 metros de altura y se divide en corona, tallo y raíces. El tallo está formado principalmente por haces vasculares rodeados de tejido parenquimatoso [57]. Las células parenquimatosas tienen múltiples funciones: almacenamiento de carbohidratos, reserva de agua, almacenamiento de nitrógeno, comunicación entre el xilema y el floema, etc. Sin embargo, su estabilidad mecánica es muy baja debido a las delgadas paredes celulares [57].

La estabilidad del tallo de la palma y los buenos resultados en las pruebas de las propiedades mecánicas del material del tallo de la palma de coco se deben principalmente a una combinación de los haces vasculares y las células parenquimatosas que en conjunto actúan como material reforzado. Según [57], el número, el diámetro y la densidad de los haces vasculares describen el refuerzo. La estructura de los haces vasculares se compone de tejido vascular reforzado por una cubierta de células de esclerenquima de pared gruesa. El tejido vascular está formado por tejidos conductores llamados vasos de xilema y floema, los vasos de xilema conducen algunos compuestos inorgánicos y orgánicos desde las raíces hasta las hojas, además de grandes cantidades de agua [62]. El conductor de alimentos se llama floema, es el encargado de transportar las sustancias orgánicas desde los lugares de fotosíntesis hasta el resto de la palma. La cubierta del haz tiene una densidad que disminuye hacia la parte central y a lo largo del tallo, está asociada al floema con una función de soporte y protección [63].

Dicho de forma más sencilla, las numerosas fibras que forman cada haz vascular proporcionan un soporte estructural porque las fibras se engrosan en forma de cubierta en un extremo. Estas fibras de alta densidad aumentan las propiedades mecánicas y la estabilidad de la madera de la palma de coco. Los haces vasculares tienen un gradiente de distribución (ver figura 3b), lo que hace que la densidad y las propiedades mecánicas de la madera de esta palmera varíen a lo largo de las

direcciones radial y longitudinal del tallo. Como se muestra en la figura 4, la densidad de la madera aumenta desde la zona interior hacia la zona periférica y disminuye desde la parte inferior hacia la parte superior del tallo. El número y la distribución de los haces vasculares, el grosor de las paredes de las células parenquimáticas, así como el grosor y el diámetro de las paredes de los haces, son algunas de las razones por las que la densidad de la madera de la palma de coco puede variar. Una baja densidad se asocia con una mayor presencia de células parenquimáticas y menos haces vasculares [57].

La figura 5 muestra el floema en medio de los vasos del xilema y la cubierta del haz en el otro extremo, los cuales juntos forman el haz vascular.

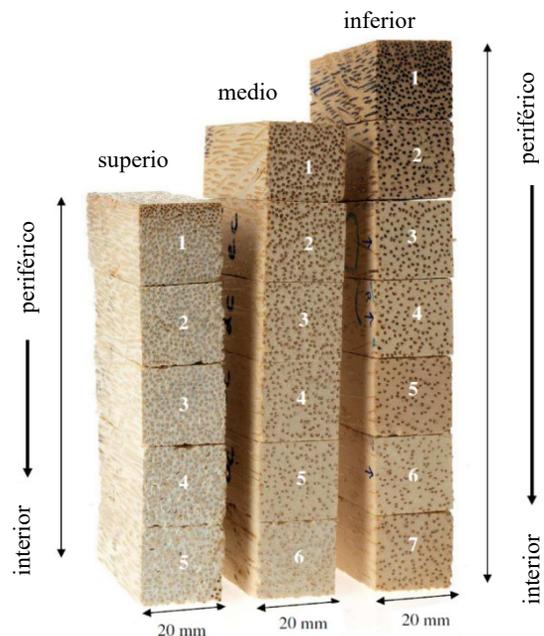


Figura 4. Distribución de la densidad de la madera [57].

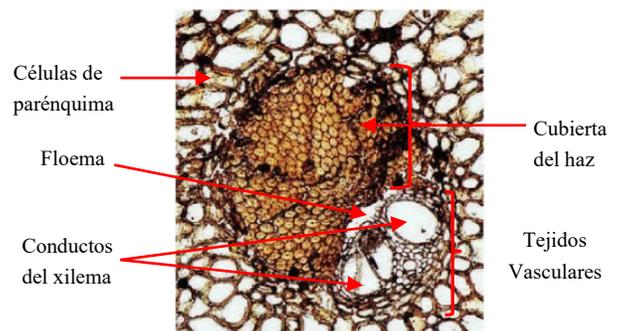


Figura 5. Anatomía de un haz vascular [61].

4. Métodos de investigación y rutas técnicas

4.1. Bioinspiración en la palma de coco

Existe una herramienta online gratuita denominada asknature.org, desarrollada para conectar a la comunidad con otras personas, ideas, métodos y conceptos para iniciarse en el campo de la biomimesis, es decir, para incorporar con éxito principios de la naturaleza en diseños que resuelvan problemas de forma sostenible [64]. Al buscar en la base de datos estrategias biológicas en las plantas para gestionar las fuerzas estructurales, se encuentra que los árboles y aquellos utilizados para obtener madera son cilindros sólidos debido a los fuertes haces vasculares distribuidos en el tallo. Como ejemplo, mencionan el bambú, cuya sección transversal es hueca pero las paredes tienen haces vasculares con un gradiente de distribución rodeados de fibras de celulosa en forma de matriz. Estos haces vasculares tienen mayor resistencia y densidad en el borde exterior [65].

A continuación, se presentan algunas estrategias del equipo Asknature que sirvieron de inspiración:

- Los haces vasculares de las plantas proporcionan resistencia mecánica al colocarse en una matriz de células como refuerzos en forma de varilla [66].
- Las fibras vegetales de las plantas que han desarrollado una estructura rígida como la madera proporcionan resistencia mecánica debido a que las fibras actúan como refuerzos [67].
- Las paredes celulares de plantas vasculares proporcionan resistencia mecánica durante las etapas de crecimiento. Las células tienen paredes delgadas que se vuelven más gruesas una vez desarrolladas en su forma madura, lo que les da fuerza mecánica propia [68].

Con la aplicación de la estrategia anterior, se busca conocer y entender las principales características estructurales de la palma de coco que se encuentra en la naturaleza panameña, para inspirarse en su estructura y hacer modelizaciones con la ayuda de un software de modelado 3D, que permita analizar o evaluar las propiedades mecánicas de la estructura bioinspirada.

Como parte de este estudio, se llevó a cabo una relación entre la vegetación de Panamá y la estrategia estructural del bambú. A su vez se observó el grosor del tallo y su altura. La palma de coco es una planta vascular con un tallo fuerte y flexible, que resiste las fuerzas de la naturaleza como el viento. Las fibras de este tipo de

planta forman un anillo estructural alrededor del tallo, que mantiene la estructura vertical de la planta, proporcionando rigidez, pero también permite el movimiento y la flexión.

La investigación experimental realizada por [57], muestra los cortes transversales macroscópicos del tallo de la palma de coco en las tres zonas principales del tallo, zona periférica, central e interior. En la investigación realizada por este autor, se tomaron muestras de cada zona y realizaron diferentes pruebas para determinar las propiedades mecánicas. Cada zona del tallo representa una clase de densidad, por lo que las propiedades de resistencia varían dentro del tallo, y por tanto la distribución de fibras en los haces vasculares es mayor en la zona periférica, así como el engrosamiento de la pared celular (por la edad de la palma). Debido a que el engrosamiento de las paredes celulares indica la existencia de capas secundarias adicionales (ver figura 7e), los haces vasculares cercanos a la corteza del tallo tienen un mayor número de capas que proporcionan una resistencia adicional en forma de cilindro a todo el tallo de la palma.

En las figuras 6, 7 y 8 se presentan diseños bioinspirados basados en las características estructurales de la palma de coco. En la figura 7a se representa la sección transversal de la parte inferior del tallo de la palma de coco que tiene haces vasculares con diferentes densidades, como se ve en la figura 7b la distribución de la densidad varía de mayor a menor desde la corteza del tallo hacia la zona interior, con tres rangos de densidades que llevan a la figura 7c que muestra la distribución microscópica de los haces vasculares en las tres zonas de la sección transversal del tallo. La distribución de la proporción de haces vasculares es 32:20:12 [61]. Con un vistazo más cercano, se observa en la figura 7d la sección transversal de un haz vascular individual rodeado de tejido parenquimatoso. Por último, si se observa de cerca en la figura 7d hay fibras de varias capas cuya sección transversal se muestra en la figura 7e. Lo que lleva al diseño bioinspirado (figura 7f) y a extraer diferentes tipos de características de la palma de coco, que permiten crear diferentes diseños de tubos cilíndricos bioinspirados.

A partir de la figura 7 se utilizó el software de modelado 3D SolidWorks v.28 (SolidWorks 2020 SP5.0) para crear diseños bioinspirados como los que se muestran en la figura 6 y 8. Los diseños desarrollados muestran elementos cilíndricos, con diferentes

configuraciones internas inspiradas en la palma de coco de Panamá y la literatura consultada.

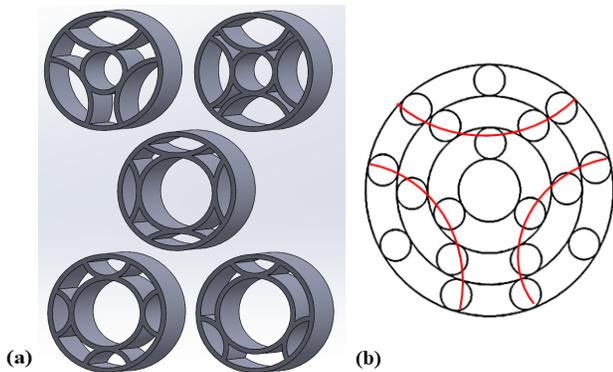


Figura 6. (a) Grupo 1, inspirado en los haces vasculares. (b) Geometría de referencia de la palma de coco.

convencionales (mecanizado en torno, proceso de embutición profunda, moldeado, corte/grabado por láser, proceso de fundición de precisión y la técnica de mecanizado por descarga eléctrica de hilo), fabricación aditiva (uso de la tecnología de impresión en 3D), laminación, entre otras técnicas de fabricación nuevas mencionadas en [69].

En cuanto a la realización de ensayos o pruebas mecánicas se pueden mencionar los métodos de comprobación de la fluidez y la tensión, ensayo cuasi-estático, ensayo dinámico de baja y de alta deformación y pruebas de choque [14]. La aplicación de estos ensayos en el ámbito de diseños bioinspirados, ha sido fundamental en la verificación de propiedades mecánicas tanto en el material natural como en el fabricado a partir

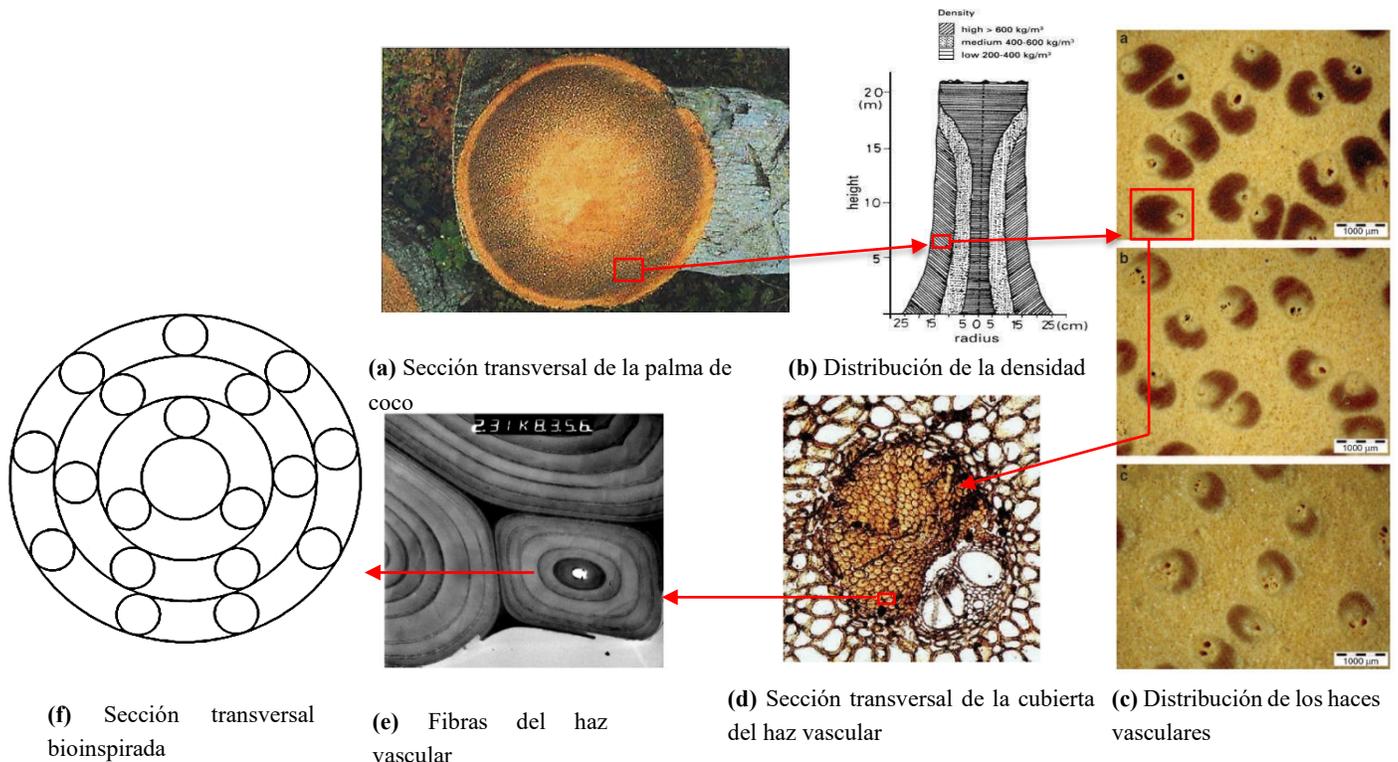


Figura 7. Diseño bioinspirado [57] (Figuras a - e).

4.2. Métodos experimentales y de simulación

Con la definición de los diseños bioinspirados, el paso a seguir es la fabricación, ensayos experimentales y análisis numérico de los cilindros.

Entre los métodos experimentales empleados en estudios de la literatura científica consultada se incluyen distintos métodos de fabricación [6], como métodos

de un diseño bioinspirado.

Los métodos de análisis numérico, reportados en la literatura científica incluyen la utilización de herramientas de análisis por elementos finitos (FEA, siglas en inglés de *Finite Element Analysis*) entre las que se encuentran Abaqus, ANSYS, CosmosWorks y LS-

DYNA. En una fase posterior del presente estudio, se espera presentar los resultados correspondientes.

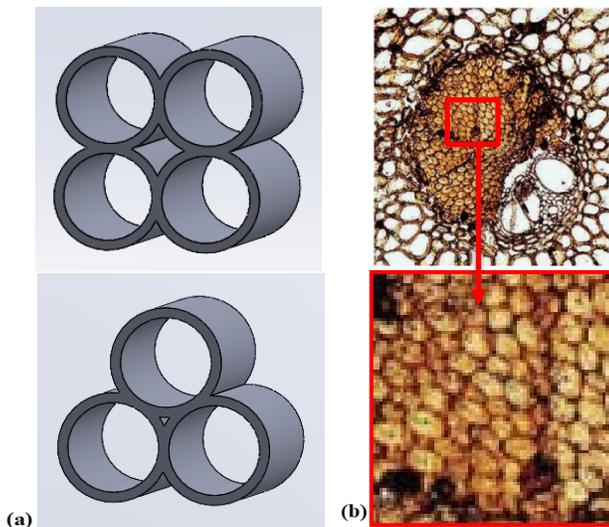


Figura 8. (a) Grupo 3, inspirado por la estructura multicelular de la cubierta de un haz vascular. (b) Geometría de referencia de la palma de coco [57].

5. Conclusiones

Esta investigación es una muestra de que todavía existen muchas fuentes de inspiración en la naturaleza y es una guía para el desarrollo de diseños de estructuras bioinspiradas. A partir de la relación de la estructura y las propiedades mecánicas/físicas de tallo de la palma de coco se crearon diseños bioinspirados.

Como se expuso, la bioinspiración es una alternativa a los métodos convencionales de diseño y permite encontrar soluciones estructurales al identificar una función deseada o identificar un problema, que se traduce a estrategias biológicas que buscamos en la naturaleza. Estas estrategias son separadas y estudiadas para la creación de un diseño, el cual va a ser evaluado de acuerdo al enfoque de la investigación [70].

Aunque los tubos cilíndricos tienen una eficacia probada como estructura para la disipación de energía, populares por su ligereza y su sencillo proceso de fabricación, esta investigación puede contribuir a mejorar el uso de este tipo estructura cilíndrica, con características bioinspiradas para la disipación de energía en estructuras más robustas, en lugar de utilizar estructuras que tienen un proceso de fabricación más elaborado; por ejemplo, una columna de hormigón y acero. Cuando los tubos cilíndricos no son suficientes, se

busca una opción con mayor resistencia. En este caso, diseños como los presentados pueden ser una opción interesante.

Los métodos experimentales incluyen distintos métodos de fabricación como el uso de la tecnología de impresión en 3D, luego la realización de ensayos o pruebas mecánicas. Los métodos de análisis numérico utilizan herramientas de análisis por elementos finitos (FEA, siglas en inglés de *Finite Element Analysis*).

REFERENCIAS

- [1] Biomimicry Institute, “Introduction - Biomimicry Toolbox”. <https://toolbox.biomimicry.org/introduction/>.
- [2] H. Hashemi Farzaneh, “Bio-inspired design: Ideation in collaboration between mechanical engineers and biologists”, 2016.
- [3] D. Urdinola Serna, A. H. Valencia Escobar, E. Patiño Mazo, D. A. Torreblanca Díaz, y A. Zuleta Gil, *Biomimética y diseño*. Bolivia, 2018.
- [4] A. Alavi Nia y M. Parsapour, “An investigation on the energy absorption characteristics of multi-cell square tubes”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 68, pp. 26–34, 2013, doi: 10.1016/j.tws.2013.01.010.
- [5] F. Baino y M. Ferraris, “Learning from Nature: Using bioinspired approaches and natural materials to make porous bioceramics”, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, vol. 14, núm. 4, pp. 507–520, 2017, doi: 10.1111/ijac.12677.
- [6] N. S. Ha y G. Lu, *A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications*, vol. 181. Elsevier Ltd, 2020.
- [7] F. Libonati y M. J. Buehler, “Advanced Structural Materials by Bioinspiration”, *Adv. Eng. Mater.*, vol. 19, núm. 5, pp. 1–19, 2017, doi: 10.1002/adem.201600787.
- [8] U. G. K. Wegst, H. Bai, E. Saiz, A. P. Tomsia, y R. O. Ritchie, “Bioinspired structural materials”, *Nat. Mater.*, vol. 14, núm. 1, pp. 23–36, 2015, doi: 10.1038/nmat4089.
- [9] P. Zhang, “Bioinspired Hierarchical Materials and Cellular Structures: Design, Modeling, and 3D Printing”, ene. 2016.
- [10] P. M. M. Pereira, G. A. Monteiro, y D. M. F. Prazeres, “General aspects of biomimetic materials”, en *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering*, Springer International Publishing, 2015, pp. 57–79.
- [11] A. Tripathi, “Bioinspired Light-Weight Materials Using Biopolymers: From Synthesis to Application”, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, 2018.
- [12] B. L. Zhou, “Bio-inspired study of structural materials”, *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 11, núm. 1, pp. 13–18, 2000, doi: 10.1016/S0928-4931(00)00136-3.
- [13] M. F. Ashby y D. R. H. Jones, *Engineering Materials 2*, Third Edition., vol. 2. 2005.
- [14] B. S. Lazarus, A. Velasco-Hogan, T. Gómez-del Río, M. A.

- Meyers, y I. Jasiuk, "A review of impact resistant biological and bioinspired materials and structures", *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, núm. 6, pp. 15705–15738, 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.10.062.
- [15] G. Palomba, T. Hone, D. Taylor, y V. Crupi, "Bio-inspired protective structures for marine applications", *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 15, núm. 5, p. 056016, sep. 2020, doi: 10.1088/1748-3190/aba1d1.
- [16] J. S. Beard, "Climax Vegetation in Tropical America", *Ecology*, vol. 25, núm. 2, pp. 127–158, abr. 1944, doi: 10.2307/1930688.
- [17] G. Vargas Ulate, "La vegetación de América Central: características, transformaciones y protección", *Anu. Estud. Centroam.*, vol. 23, núm. 1–2, pp. 7–34, 1997, doi: 10.2307/25661291.
- [18] A. Burnett, "Biomimicry, Bioutilization, Biomorphism - Terrapin Bright Green", ene. 17, 2015. <https://www.terrapinbrightgreen.com/blog/2015/01/biomimicry-bioutilization-biomorphism/>.
- [19] T. A. Owoseni, "Bioinspired Design", 2013.
- [20] M. Helms, S. S. Vattam, y A. K. Goel, "Biologically inspired design: process and products", *Des. Stud.*, vol. 30, núm. 5, pp. 606–622, 2009, doi: 10.1016/j.destud.2009.04.003.
- [21] S. E. Naleway, M. M. Porter, J. McKittrick, y M. A. Meyers, "Structural Design Elements in Biological Materials: Application to Bioinspiration", *Adv. Mater.*, vol. 27, núm. 37, pp. 5455–5476, 2015, doi: 10.1002/adma.201502403.
- [22] H. P. S. Abdul Khalil, I. U. H. Bhat, M. Jawaid, A. Zaidon, D. Hermawan, y Y. S. Hadi, "Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review", *Mater. Des.*, vol. 42, núm. June 2018, pp. 353–368, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2012.06.015.
- [23] M. Imani, M. Donn, y Z. Balador, "Bio-Inspired Materials: Contribution of Biology to Energy Efficiency of Buildings", en *Handbook of Ecomaterials*, Springer International Publishing, 2018, pp. 1–24.
- [24] M. A. Meyers, J. McKittrick, y P. Y. Chen, "Structural biological materials: Critical mechanics-materials connections", *Science (80-.)*, vol. 339, núm. 6121, pp. 773–779, 2013, doi: 10.1126/science.1220854.
- [25] J. Y. Ooi, T. Schork, H. Rasouli, y S. Malek, "The Role of Defects in 3D Printing of Bio-inspired Cellular Composites", pp. 3–4, 2007.
- [26] C. Paulina Valenzuel, A. Cecilia Bustos, J. P. Lasserre, y E. William Gacitúa, "Fracturas en madera de eucalyptus nitens: Efecto de las propiedades mecánicas a nivel ultraestructural y de la anatomía celular", *Maderas Cienc. y Tecnol.*, vol. 14, núm. 2, pp. 225–238, 2012, doi: 10.4067/S0718-221X2012000200009.
- [27] M. Presas, J. Y. Pastor, J. Llorca, A. R. De Arellano-López, J. Martínez-Fernández, y R. Sepúlveda, "Microestructura y propiedades mecánicas del SiC biomórfico obtenido a partir de eucalipto", *Bol. la Soc. Esp. Ceram. y Vidr.*, vol. 44, núm. 6, pp. 363–367, 2005, doi: 10.3989/cyv.2005.v44.i6.337.
- [28] L. Rossi y F. J. R. Galino, "Estructura de Neumáticos Bio-Inspirada en la Madera de Cactus", pp. 552–558, 2017, doi: 10.5151/sigradi2017-085.
- [29] H. H. Tsang, K. M. Tse, K. Y. Chan, G. Lu, y A. K. T. Lau, "Energy absorption of muscle-inspired hierarchical structure: Experimental investigation", *Compos. Struct.*, vol. 226, núm. May, p. 111250, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111250.
- [30] V. Valtchev y S. Mintova, "Bioinspired Porous Materials", *Ordered Porous Solids*, pp. 477–499, 2009, doi: 10.1016/B978-0-444-53189-6.00018-4.
- [31] B. Wang, W. Yang, J. McKittrick, y M. A. Meyers, "Keratin: Structure, mechanical properties, occurrence in biological organisms, and efforts at bioinspiration", *Prog. Mater. Sci.*, vol. 76, pp. 229–318, 2016, doi: 10.1016/j.pmatsci.2015.06.001.
- [32] A. Bührig-Polaczek *et al.*, "Biomimetic cellular metals - Using hierarchical structuring for energy absorption", *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 11, núm. 4, pp. 1–20, 2016, doi: 10.1088/1748-3190/11/4/045002.
- [33] J. Tsenn, J. S. Linsey, y D. A. McAdams, "Development of a Search Tool to Identify Structural Design Principles for Bioinspired Materials Design", ago. 2014, doi: 10.1115/detc2014-34291.
- [34] Z. Xin, X. Zhang, Y. Duan, y W. Xu, "Nacre-inspired design of CFRP composite for improved energy absorption properties", *Compos. Struct.*, vol. 184, pp. 102–109, ene. 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.09.075.
- [35] L. Zorretto y D. Ruffoni, "Wood-Inspired 3D-Printed Helical Composites with Tunable and Enhanced Mechanical Performance", *Adv. Funct. Mater.*, vol. 29, núm. 1, p. 1805888, ene. 2019, doi: 10.1002/adfm.201805888.
- [36] M. Zou, S. Xu, C. Wei, H. Wang, y Z. Liu, "A bionic method for the crashworthiness design of thin-walled structures inspired by bamboo", *Thin-Walled Struct.*, vol. 101, pp. 222–230, abr. 2016, doi: 10.1016/j.tws.2015.12.023.
- [37] Z. Feng, Z. Luo, y J. Xiang, "Structural bionic design for thin-walled energy absorber tube and parametric analysis", *58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Struct. Struct. Dyn. Mater. Conf. 2017*, núm. January, pp. 1–8, 2017, doi: 10.2514/6.2017-1358.
- [38] J. feng Ma, W. yi Chen, L. Zhao, y D. hai Zhao, "Elastic Buckling of Bionic Cylindrical Shells Based on Bamboo", *J. Bionic Eng.*, vol. 5, núm. 3, pp. 231–238, sep. 2008, doi: 10.1016/S1672-6529(08)60029-3.
- [39] B. C. Chen, M. Zou, G. M. Liu, J. F. Song, y H. X. Wang, "Experimental study on energy absorption of bionic tubes inspired by bamboo structures under axial crushing", *Int. J. Impact Eng.*, vol. 115, núm. April 2017, pp. 48–57, 2018,

- doi: 10.1016/j.ijimpeng.2018.01.005.
- [40] D. Hu, Y. Wang, B. Song, L. Dang, y Z. Zhang, “Energy-absorption characteristics of a bionic honeycomb tubular nested structure inspired by bamboo under axial crushing”, *Compos. Part B Eng.*, vol. 162, pp. 21–32, abr. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.10.095.
- [41] H. Yin, Y. Xiao, G. Wen, Q. Qing, y X. Wu, “Crushing analysis and multi-objective optimization design for bionic thin-walled structure”, *Mater. Des.*, vol. 87, pp. 825–834, dic. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.08.095.
- [42] H. Yin, Y. Xiao, G. Wen, N. Gan, C. Chen, y J. Dai, “Multi-objective robust optimization of foam-filled bionic thin-walled structures”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 109, pp. 332–343, dic. 2016, doi: 10.1016/j.tws.2016.10.011.
- [43] H. Oba *et al.*, “State of the World’s Plants”, 2016. [En línea]. Disponible en: http://arbtalk.co.uk/forum/attachments/tree-health-care/19204d1250773892-decay-picus-02nic.pdf%0Ahttps://www.forestry.gov.uk/safetreemanagement%0Ahttp://www.springerlink.com/index/V7031376R783771.pdf%0Ahttps://stateoftheworldsplants.com/report/sotwp_2016.
- [44] Z. Zhao *et al.*, “Synergistic Effects of Chiral Morphology and Reconfiguration in Cattail Leaves”, *J. Bionic Eng.*, vol. 12, núm. 4, pp. 634–642, oct. 2015, doi: 10.1016/S1672-6529(14)60153-0.
- [45] T. Xu, N. Liu, Z. Yu, T. Xu, y M. Zou, “Crashworthiness Design for Bionic Bumper Structures Inspired by Cattail and Bamboo”, *Appl. Bionics Biomech.*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/5894938.
- [46] Q. Liu, J. Ma, Z. He, Z. Hu, y D. Hui, “Energy absorption of bio-inspired multi-cell CFRP and aluminum square tubes”, *Compos. Part B Eng.*, vol. 121, pp. 134–144, jul. 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.03.034.
- [47] J. Xiang, J. Du, D. Li, y F. Scarpa, “Numerical analysis of the impact resistance in aluminum alloy bi-tubular thin-walled structures designs inspired by beetle elytra”, *J. Mater. Sci.*, vol. 52, núm. 22, pp. 13247–13260, nov. 2017, doi: 10.1007/s10853-017-1420-z.
- [48] P. Hao y J. Du, “Energy absorption characteristics of bio-inspired honeycomb column thin-walled structure under impact loading”, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 79, pp. 301–308, mar. 2018, doi: 10.1016/j.jmbm.2018.01.001.
- [49] L. Zhang, Z. Bai, y F. Bai, “Crashworthiness design for bio-inspired multi-cell tubes with quadrilateral, hexagonal and octagonal sections”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 122, pp. 42–51, ene. 2018, doi: 10.1016/j.tws.2017.10.010.
- [50] X. Yu, L. Pan, J. Chen, X. Zhang, y P. Wei, “Experimental and numerical study on the energy absorption abilities of trabecular–honeycomb biomimetic structures inspired by beetle elytra”, *J. Mater. Sci.*, vol. 54, núm. 3, pp. 2193–2204, feb. 2019, doi: 10.1007/s10853-018-2958-0.
- [51] Y. Zhang, X. Xu, J. Wang, T. Chen, y C. H. Wang, “Crushing analysis for novel bio-inspired hierarchical circular structures subjected to axial load”, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 140, pp. 407–431, may 2018, doi: 10.1016/j.ijmeecsci.2018.03.015.
- [52] C. Y. Wang, Y. Li, W. Z. Zhao, S. C. Zou, G. Zhou, y Y. L. Wang, “Structure design and multi-objective optimization of a novel crash box based on biomimetic structure”, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 138–139, pp. 489–501, abr. 2018, doi: 10.1016/j.ijmeecsci.2018.01.032.
- [53] H. H. Tsang y S. Raza, “Impact energy absorption of bio-inspired tubular sections with structural hierarchy”, *Compos. Struct.*, vol. 195, núm. March, pp. 199–210, 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.04.057.
- [54] S. Liu, Z. Tong, Z. Tang, Y. Liu, y Z. Zhang, “Bionic design modification of non-convex multi-corner thin-walled columns for improving energy absorption through adding bulkheads”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 88, pp. 70–81, mar. 2015, doi: 10.1016/j.tws.2014.11.006.
- [55] N. S. Ha, G. Lu, y X. Xiang, “High energy absorption efficiency of thin-walled conical corrugation tubes mimicking coconut tree configuration”, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 148, pp. 409–421, nov. 2018, doi: 10.1016/j.ijmeecsci.2018.08.041.
- [56] C. Hundertmark, R. Tinter, M. Ortelt, y M. J. B. Hauser, “Diatom-inspired Plastic Deformation Elements for Energy Absorption in Automobiles”, *J. Bionic Eng.*, vol. 12, núm. 4, pp. 613–623, oct. 2015, doi: 10.1016/S1672-6529(14)60151-7.
- [57] L. Fathi, “Structural and mechanical properties of the wood from coconut palms, oil palms and date palms”, p. 248, 2014.
- [58] K. Wicomb, “Cocos nucifera in cool lighting”, sep. 25, 2010. <https://www.flickr.com/photos/36838058@N03/5208216708/in/album-72157625476346675/>.
- [59] C. R. Clement, D. Zizumbo-Villarreal, C. H. Brown, R. G. Ward, A. Alves-Pereira, y H. C. Harries, “Coconuts in the Americas”, *Bot. Rev.*, vol. 79, núm. 3, pp. 342–370, sep. 2013, doi: 10.1007/s12229-013-9121-z.
- [60] N. M. Nayar, *The Coconut*, 1st Edition. 2017.
- [61] L. Fathi y A. Frühwald, “The role of vascular bundles on the mechanical properties of coconut palm wood”, *Wood Mater. Sci. Eng.*, vol. 9, núm. 4, pp. 214–223, oct. 2014, doi: 10.1080/17480272.2014.887774.
- [62] M. Megías, P. Molist, y M. Pombal, “Atlas de Histología Vegetal y Animal. Tejidos vegetales. Conductores”, 2019. https://mmegias.webs.uvigo.es/1-vegetal/guiada_v_conductores.php.
- [63] M. Viney, “Anatomy: Monocot Stems”, 2008. <http://petrifiedwoodmuseum.org/AnatomyMonocotStems.htm>.
- [64] I. López Forniés, “Modelo metodológico de diseño

- conceptual con enfoque biomimético”, Universidad de Zaragoza, 2012.
- [65] E. Banwell, “Fiber arrangement is highly efficient: Puntingpole Bamboo - AskNature”, jul. 02, 2020. <https://asknature.org/strategy/fiber-arrangement-is-highly-efficient/>.
- [66] AskNature Team, “Rod-like reinforcements provide strength: Plants”, ago. 18, 2016. <https://asknature.org/strategy/rod-like-reinforcements-provide-strength/>.
- [67] AskNature Team, “Reinforced fibers provide strength: Plants”, sep. 14, 2016. <https://asknature.org/strategy/reinforced-fibers-provide-strength/>.
- [68] AskNature Team, “Structural composition provides strength in changing conditions : Phyllanthaceae ”, sep. 14, 2016. <https://asknature.org/strategy/structural-composition-provides-strength-in-changing-conditions/>.
- [69] C. Zhang, D. A. Mcadams, y J. C. Grunlan, “Nano/Micro-Manufacturing of Bioinspired Materials: a Review of Methods to Mimic Natural Structures”, *Adv. Mater.*, vol. 28, núm. 30, pp. 6292–6321, ago. 2016, doi: 10.1002/adma.201505555.
- [70] D. DeLuca, “The power of the Biomimicry Design Spiral”, *Biomimicry Institute*, jun. 14, 2016. <https://biomimicry.org/biomimicry-design-spiral/>.

Ubicación y dimensionamiento óptimo de generación distribuida fotovoltaica en redes de distribución usando PSO

Optimal location and dimensioning of photovoltaic distributed generation in distribution networks using PSO

Alexander Águila-Téllez^{1*} , Diego González¹ , Gonzalo Gutiérrez¹ , Leony Ortiz¹ 

¹Universidad Politécnica Salesiana, Grupo de Investigación: GIREI, Ecuador

aaguila@ups.edu.ec; dgonzalezs1@est.ups.edu.ec; ggtierrezs@est.ups.edu.ec; lortizm@ups.edu.ec

Fecha de recepción: 27 de mayo de 2022; Fecha de aprobación: 24 de junio de 2022.

*Autor de correspondencia: Alexander Águila-Téllez (aaguila@ups.edu.ec)

RESUMEN. Este artículo presenta la ubicación y el dimensionamiento óptimo de la generación distribuida con inyección de potencia activa en sistemas de distribución radial mediante un flujo de potencia óptimo a través del algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO). Los criterios propuestos como objetivos son minimizar las pérdidas de potencia en las líneas y mejorar el perfil de los voltajes reduciendo las desviaciones con respecto al valor nominal. Como variable de función objetivo también se define el cumplimiento de estos criterios considerando la minimización de los costos asociados a la generación distribuida. Las restricciones propuestas están sujetas al balance de potencias, los márgenes permisibles de voltaje y los límites de inyección de potencia de la generación distribuida. El análisis se llevó a cabo en los sistemas de distribución radial IEEE de 15 barras e IEEE de 33 barras como casos de estudio, y la implementación se desarrolló en el entorno del software matemático MATLAB. La metodología utilizada (PSO) también permitió mejorar los índices de condiciones de calidad, como lo son la desviación de voltaje promedio y la desviación máxima del voltaje. Los resultados obtenidos muestran que el método utilizado para la ubicación y el dimensionamiento óptimo de la generación distribuida logren de forma óptima minimizar las pérdidas de potencia, mejorar los niveles de voltaje cumpliendo con el objetivo de mínimo costo.

Palabras clave. *Generación distribuida, sistemas de distribución, optimización de enjambre de partículas, perfil de voltaje, minimización de pérdida de potencia.*

ABSTRACT. This article presents the location and optimal sizing of distributed generation with active power injection in radial distribution systems by means of an optimal power flow through the particle swarm optimization (PSO) algorithm. The criteria proposed as objectives are to minimize power losses in the lines and improve the voltage profile and reduce deviations from the nominal value. Compliance with these criteria is also defined as an objective function variable, considering the minimization of costs associated with distributed generation. The restrictions are subject to the power balance, the permissible voltage margins and the power injection limits of distributed generation. The analysis was carried out in the IEEE 15-bar and IEEE 33-bar radial distribution systems as case studies, and the implementation was developed in the MATLAB mathematical software environment. The methodology used (PSO) also allowed to improve the indices of quality conditions, such as the average voltage deviation and the maximum voltage deviation. The results obtained show that the method used for the location and optimal sizing of distributed generation optimally manages to minimize power losses, improve voltage levels, fulfilling the objective of minimum cost.

Keywords. *Distributed power generation, distribution systems, particle swarm optimization, power loss minimization, voltage profile.*

1. Introducción

El estudio de la optimización de flujos de potencia en redes de distribución radial es considerado importante para entregar un suministro de energía eléctrica con

condiciones de calidad al usuario [1]. Los sistemas de distribución radial tienen una generación centralizada localizada lejos de la demanda, por lo cual una implementación de generación distribuida (GD)

contribuye a mejorar las condiciones técnicas, económicas y ambientales en el abastecimiento de la energía eléctrica [2].

La generación distribuida se define como “la generación de electricidad por instalaciones que son más pequeñas que las grandes centrales generadoras convencionales, y que permiten la interconexión en un punto muy cercano de la carga dentro de un sistema de potencia” (IEEE) [3].

La generación distribuida frecuentemente utiliza fuentes de energía renovables no convencionales, como lo son, la energía solar, la eólica, la biomasa, entre otras también consideradas no extinguidas y no contaminantes, debido a que no aportan grandes emisiones de gases a la atmósfera, y contribuyen a minimizar el impacto en el ecosistema alrededor de sus instalaciones [4], [5].

Las variables eléctricas mejoradas con la implementación de un flujo óptimo de potencia (OFP) a partir de la adecuada selección, ubicación y dimensionamiento de generación distribuida son: mejoramiento del perfil de voltaje, reducción de pérdidas por efecto Joule, reducción de flujos de corriente, mayor confiabilidad, etc. [6], [7]. El mejoramiento conjunto de estas variables contribuye a elevar la calidad de servicio y la eficiencia en las redes de distribución, permitiendo además mayores facilidades de seccionamiento de la red ante interrupciones del servicio eléctrico.

La GD se encuentra actualmente en un gran desarrollo tecnológico y cada día es mayor la penetración de las nuevas tecnologías de generación renovable. Sin embargo, todavía los costos de inversión, operación y mantenimiento se mantienen relativamente altos, por tal motivo es de vital importancia analizar la inyección de potencia a partir de energías renovables mediante técnicas de optimización que involucren el análisis de costos [7–9].

La ubicación óptima de la GD reduce un consumo de potencia de un solo nodo de generación, permitiendo a las cargas abastecerse de otras generaciones más cercanas a ellas, minimizando las corrientes que fluyen por las líneas de distribución, logrando una reducción tanto de las pérdidas de potencia activa como de las de potencia reactiva [10].

La inyección de generación de potencia activa y reactiva puede lograrse a través de distintos tipos de generación distribuida que aprovechan diferentes fuentes de energía [11]. Sin embargo, con generación solar fotovoltaica tradicional y aprovechando al máximo la curva de capacidad de estos generadores estáticos se logra entregar mayoritariamente potencia activa, lo cual puede afectar el factor de potencia visto por la red externa. [12], [13].

La energía solar se transforma en energía eléctrica mediante sistemas fotovoltaicos compuestos principalmente por paneles fotovoltaicos, este tipo de sistemas tiene beneficios como reducir el impacto ambiental [14]. La utilización de una fuente de energía considerada casi inagotable mejora la calidad de vida social, aumenta las condiciones técnicas de suministro de energía, pero con una desventaja que al estar en desarrollo tiene altos costos de implementación. Por este motivo en esta investigación se propone un modelo que permite compensar las variables eléctricas de un sistema de distribución mediante la ubicación óptima y dimensionamiento de generación solar considerando las restricciones de costos de esta tecnología [9], [15].

En este trabajo se propone un modelo de optimización de flujos de potencia mediante el algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO), aplicado en los sistemas de distribución radial IEEE 15 nodos e IEEE 33 nodos, ubicando y dimensionando de manera óptima la generación distribuida solar con un tamaño óptimo, tomando como función objetivo del problema la minimización de costos.

El artículo se encuentra estructurado de la siguiente forma, en la sección 2 se muestra una revisión bibliográfica sobre el análisis de la ubicación de generación distribuida mediante diferentes métodos, la sección define los datos de los sistemas de distribución radial a implementar, a continuación, la sección IV presenta la formulación del problema con su función objetivo y restricciones utilizadas. En la sección V encontramos la metodología de ubicación óptima de la GD por medio del algoritmo PSO. Tenemos en la sección 3 el análisis de los resultados y por último las conclusiones se encuentran en la sección 4.

2. Materiales y métodos

Ubicación y dimensionamiento de generación distribuida

Muchos autores han desarrollado artículos con propuestas de modelos matemáticos para dar solución a los flujos de potencia en condiciones no deseables. Algunos autores buscan mejorar una determinada variable, en otros casos se proponen mejoramientos con más de un objetivo, como mejorar el perfil de voltaje, minimizar costos, minimizar pérdidas, minimizar impacto ambiental, o análisis conjunto de las variables mencionadas [16]. Estas funciones objetivos han estado sujetas a distintos escenarios y distintas restricciones de niveles de voltajes, balance de flujo de potencias, factor de potencia, límites de inyección de potencia, tipo de GD y número de GD, etc. [17].

Los métodos implementados para la ubicación de GD son extensos y variados, existen métodos tradicionales, analíticos y numéricos, heurísticas y metas heurísticas, algunos de ellos son la programación no lineal (NLP) [18], programación no lineal entera mixta (MINLP) [19], algoritmo de búsqueda cuco (CSA) [20], optimización por enjambre de partículas (PSO) [21–24], optimización colonia de hormigas (ACO) [8], algoritmo genético (GA) [25], algoritmo salto de rana modificado (MSFL) [26], colonia de abejas artificiales (ABC) [27], algoritmo de murciélago (BA) [28], algoritmo de polinización de flores (FPA), optimización de hormiga león (ALO) [29], algoritmo de optimización de ballenas (WOA) [10], optimización basada en la enseñanza - aprendizaje (TBLO), optimización de malezas invasoras (IWO) [30], entre otros. Estos métodos pueden ser implementados en computador para su desarrollo, la mayoría se basa en comportamientos sociales de un grupo de individuos, de igual manera en su conocimiento, aprendizaje, en modificaciones genéticas, y muchos de estos métodos pueden ser combinados para obtener mejores resultados, estos son conocidos como híbridos [15].

La tabla 1 muestra algunos de los resultados propuestos por los autores para la ubicación óptima de generación distribuida en sistemas de 15 y 33 barras de la IEEE.

Tabla 1. Comparación de resultados de ubicación de generación distribuida.

Ref.	Sistema IEEE	Pérdidas (kW)	Tamaño GD (MW)	Nodos escogidos
[31]	IEEE 15	45.80	0.68	6
[32]	IEEE 15	36.55	0.20; 0.25; 0.20	6; 11; 15
[10]	IEEE 15	42.82	0.67	15
[31]	IEEE 33	125.16	1.54	30
[19]	IEEE 33	72.79	0.77; 1.04; 1.15	13; 24; 30
[33]	IEEE 33	88.68	0.59; 0.19; 1.01	14; 18; 32
[24]	IEEE 33	72.85	1.05; 1.09; 0.80	31; 20; 10
[34]	IEEE 33	72.89	0.79; 1.07; 1.01	13; 24; 30
[21]	IEEE 33	74.09	0.69; 0.99; 1.28	14; 24; 29
[30]	IEEE 33	85.86	0.56; 0.1; 1.16	14; 18; 32
[18]	IEEE 33	67.8	2.53	6
[4]	IEEE 33	74.21	0.88; 0.93; 0.93	11; 29; 24
[14]	IEEE 33	37.85	0.68; 0.13; 1.11	14; 18; 32

2.1. Sistemas de distribución radial

2.1.1. Sistema de distribución radial de 15 nodos

El sistema de distribución radial de 15 nodos utilizado en esta investigación como caso de estudio, tiene una potencia base de 500kVA y un voltaje del sistema de 11kV [35]. El diagrama unifilar de este sistema de prueba de 15 nodos se muestra en la figura 1.

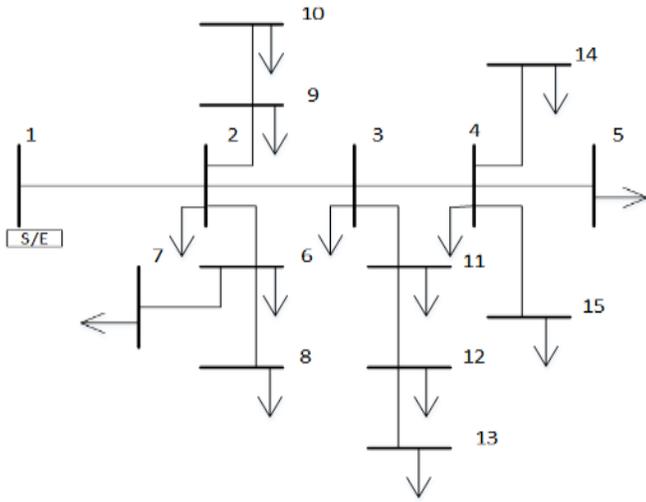


Figura 1. Sistema de distribución radial IEEE 15 nodos.

2.1.2. Sistema de distribución radial de 33 nodos

El sistema de distribución radial de 33 nodos utilizado en esta investigación como caso de estudio, tiene una potencia base de 10 MVA y un voltaje del sistema de 12.66kV [31]. El flujo de potencia se calculó mediante Matlab haciendo una corroboración de los resultados mediante simulaciones en el software DIgSILENT Power Factory. Los datos de entrada de este sistema se encuentran en la tabla 2. El diagrama unifilar de este sistema de prueba de 33 nodos se muestra en la figura 2.

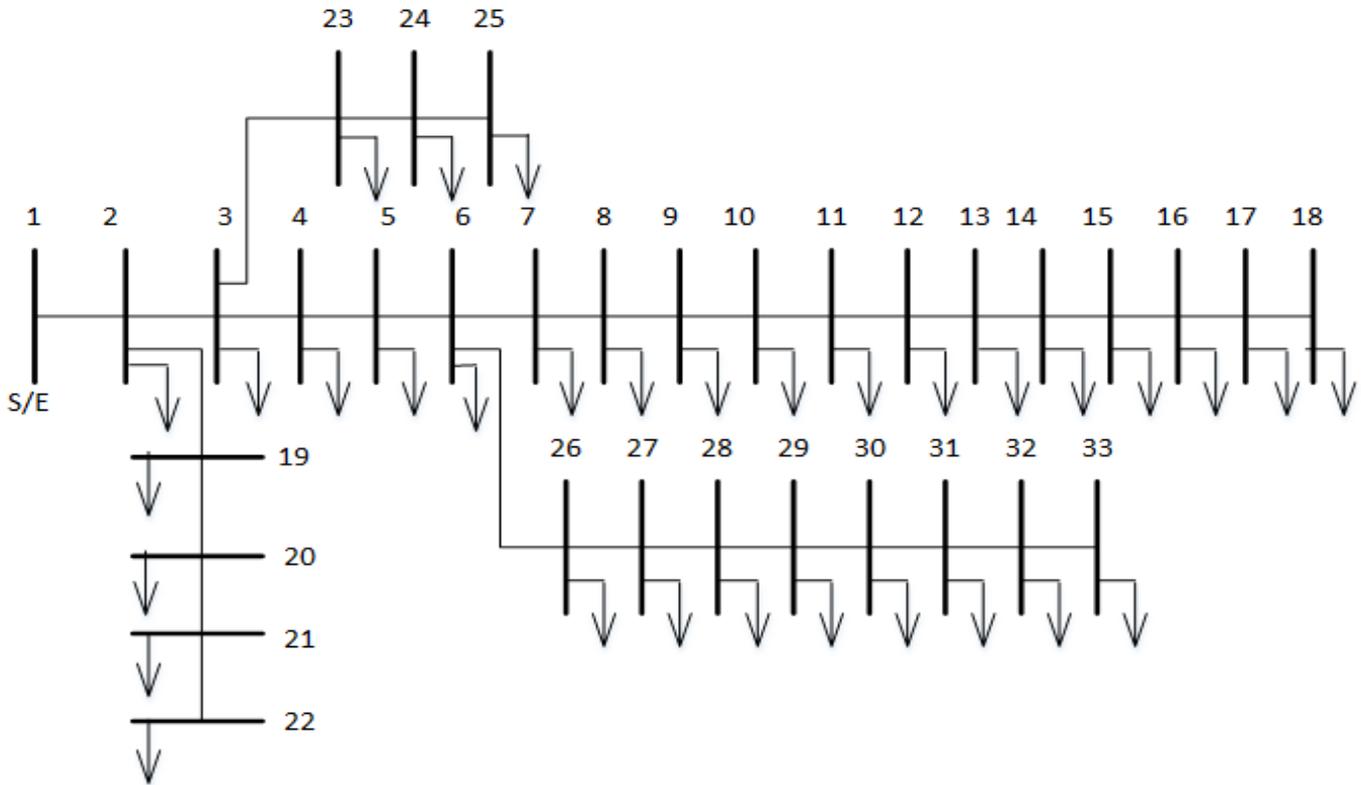


Figura 2. Sistema de distribución radial IEEE 33 nodos.

Tabla 2. Datos de resistencia, impedancia y potencias del sistema radial de 33 nodos.

Nº Rama	Barra inicial	Barra final	R (Ω)	X (Ω)	Nº Nodo	S (kW)	Q (kVAr)
1	1	2	0,0922	0,047	1	0	0
2	2	3	0,493	0,2511	2	100	60
3	3	4	0,366	0,1864	3	90	40
4	4	5	0,3811	0,1941	4	120	80
5	5	6	0,819	0,707	5	60	30
6	6	7	0,1872	0,6188	6	60	20
7	7	8	1,7114	1,2351	7	200	100
8	8	9	1,03	0,74	8	200	100
9	9	10	1,044	0,74	9	60	20
10	10	11	0,1966	0,065	10	60	20
11	11	12	0,3744	0,1238	11	45	30
12	12	13	1,468	1,155	12	60	35
13	13	14	0,5416	0,7129	13	60	35
14	14	15	0,591	0,526	14	120	80
15	15	16	0,7463	0,545	15	60	10
16	16	17	1,289	1,721	16	60	20
17	17	18	0,732	0,574	17	60	20
18	2	19	0,164	0,1565	18	90	40
19	19	20	1,5042	1,3554	19	90	40
20	20	21	0,4095	0,4784	20	90	40
21	21	22	0,7089	0,9373	21	90	40
22	3	23	0,4512	0,3083	22	90	40
23	23	24	0,898	0,7091	23	90	50
24	24	25	0,896	0,7011	24	420	200
25	6	26	0,203	0,1034	25	420	200
26	26	27	0,2842	0,1447	26	60	25
27	27	28	1,059	0,9337	27	60	25
28	28	29	0,8042	0,7006	28	60	20
29	29	30	0,5075	0,2585	29	120	70
30	30	31	0,9744	0,963	30	200	600
31	31	32	0,3105	0,3619	31	150	70
32	32	33	0,341	0,5302	32	210	100
					33	60	40

2.1.3. Voltajes en Matlab y DigSILENT Power Factory

Los valores obtenidos de voltajes mediante la implementación realizada en Matlab presentados en la tabla 3 son comparados con los resultados del Power

Factory para verificar la efectividad del método empleado, en este caso Newton Raphson completo, para ambos sistemas de distribución radial, de 15 y 33 nodos.

Tabla 3. Comparación de voltajes obtenidos en MATLAB y power factory del sistema de 15 y 33 nodos.

SISTEMA IEEE 15 NODOS			SISTEMA IEEE 33 NODOS		
N° Nodo	V p.u MATLAB	V p.u DIgSILENT	Nodo	V p.u MATLAB	V p.u DIgSILENT
1	1,000	1,000	1	1,0000	1,0000
2	0,971	0,971	2	0,9970	0,9970
3	0,957	0,957	3	0,9829	0,9829
4	0,951	0,951	4	0,9754	0,9754
5	0,950	0,950	5	0,9679	0,9680
6	0,958	0,958	6	0,9495	0,9495
7	0,956	0,956	7	0,9459	0,9460
8	0,957	0,957	8	0,9323	0,9323
9	0,968	0,968	9	0,9259	0,9260
10	0,967	0,967	10	0,9201	0,9201
11	0,950	0,950	11	0,9192	0,9193
12	0,946	0,946	12	0,9177	0,9178
13	0,945	0,945	13	0,9115	0,9116
14	0,949	0,949	14	0,9092	0,9093
15	0,948	0,948	15	0,9078	0,9079
-	-	-	16	0,9064	0,9065
-	-	-	17	0,9043	0,9044
-	-	-	18	0,9037	0,9038
-	-	-	19	0,9965	0,9965
-	-	-	20	0,9929	0,9929
-	-	-	21	0,9922	0,9922
-	-	-	22	0,9916	0,9916
-	-	-	23	0,9793	0,9793
-	-	-	24	0,9726	0,9726
-	-	-	25	0,9693	0,9693
-	-	-	26	0,9475	0,9476
-	-	-	27	0,9450	0,9450
-	-	-	28	0,9335	0,9336
-	-	-	29	0,9253	0,9254
-	-	-	30	0,9217	0,9218
-	-	-	31	0,9176	0,9176
-	-	-	32	0,9167	0,9167
-	-	-	33	0,9164	0,9164

2.2. Formulación del problema

El objetivo principal del método propuesto es minimizar los costos de la generación distribuida

requerida garantizando el cumplimiento de las restricciones y el mejoramiento de los perfiles de voltaje

y la minimización de las pérdidas de potencia. La siguiente ecuación define este análisis.

$$\min FO = \sum_{i=1}^n (a_{inst} * P_{DGi} + b_{O\&M} * P_{DGi}) + c_{perd} * P_{perd} \quad (1)$$

Donde:

Incluimos dos factores de costos relacionados con la GD que son un a_{inst} costos de instalación, y un $b_{O\&M}$ costos de operación y mantenimiento [20], además un

c_{perd} representando los costos de pérdidas del sistema [31], que multiplican a la potencias P_{perd} , potencia total de pérdidas del sistema en (kW) [36].

$$P_{perd} = \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i} I_{ij}^2 * R_{ij} \quad (2)$$

Para poder calcular la función objetivo es importante calcular las pérdidas totales del sistema que viene dada por el cuadrado de las corrientes (I_{ij}^2) de línea multiplicada por su resistencia (R_{ij}) [37], [38].

$$\sum_{i=1}^n PGD_i + P_{se} = P_c + P_{perd} \quad (3)$$

La ecuación 3 nos muestra el balance de potencias que debe cumplir el sistema donde toda la potencia activa de generación ($PGD_i + P_{se}$) debe ser igual a la sumatoria de las potencias activas en las cargas (P_c) más la potencia de pérdidas activas totales (P_{perd}) [39], [40].

$$PGD_{min} \leq \sum_i PGD_i \leq PGD_{max} \quad (4)$$

La ecuación (4) establece los límites de búsqueda del algoritmo para las capacidades candidatas a instalar de GD, donde se consideran desde el 30% de la carga total del sistema hasta la potencia máxima definida como la sumatoria de la potencia activa en las cargas más las pérdidas de activa en el sistema [37].

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (5)$$

Los límites de voltajes para cada nodo se definen en (5) y son restringidos al $\pm 10\%$ del valor nominal del voltaje, es decir, un valor mínimo de 0.9 p.u. y un valor máximo de 1.1 en p.u [41].

$$DPV = \sum_{i=1}^n \frac{|V_{nom} - V_i|}{n} \quad (6)$$

Como indicador de los resultados del perfil de voltaje se define en (6) la desviación promedio de voltaje, que muestra en forma general el mejoramiento logrado en el sistema [7]. Las ecuaciones (6) y (7) definen el mejoramiento del perfil de voltaje dentro del problema de optimización.

$$MDV = \max |V_{nom} - V_i|; i = 1 \dots n \quad (7)$$

En (7) se calcula la máxima desviación de voltaje como indicador que muestra la peor condición de voltaje en el sistema.

2.2.1. Flujo de potencia por Newton Raphson

Para la solución del flujo de potencias en el sistema a partir del método de Newton Raphson completo [42], [43], se definen datos iniciales de los sistemas analizados, con los cuales son calculadas las pérdidas de potencia en cada nodo, tanto de activa como reactiva, se calcula además el factor de potencia y las desviaciones de voltaje.

Algoritmo 1: Flujo de Potencia por Newton-Raphson.

Paso 1: Entrada de datos de resistencia e impedancia de líneas, generación y carga, tipos de barra.

Paso 2: Evaluar la matriz Ybarra

Paso 3: Calcular ΔP y ΔQ y obtener la Pcal y Qcal.

$$\Delta P = p^{neta} - p^{calc}$$

$$\Delta Q = p^{neta} - p^{calc}$$

$$P_i^{calc} = G_{ii} * V_i^2 + \sum_i^n V_i * V_j [G_{ij} * \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} * \text{sen}(\theta_{ij})]$$

$$Q_i^{calc} = -B_{ii} * V_i^2 + \sum_i^n V_i * V_j [G_{ij} * \text{sen}(\theta_{ij}) - B_{ij} * \cos(\theta_{ij})]$$

Paso 4: Establecer la Matriz Jacobiana.

$$J = \begin{bmatrix} J11 & J12 \\ J21 & J22 \end{bmatrix}$$

$$J11 = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix}$$

$$J12 = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial V_{pq1}} |V_{pq1}| & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_{pqn}} |V_{pqn}| \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial V_{pq1}} |V_{pq1}| & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_{pqn}} |V_{pqn}| \end{bmatrix}$$

$$J21 = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{pq1}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_{pq1}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_{pq1}}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{pqn}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_{pqn}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_{pqn}}{\partial \delta_n} \end{bmatrix}$$

$$J22 = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{pq1}}{\partial V_{pq1}} |V_{pq1}| & \dots & \frac{\partial Q_{pq1}}{\partial V_{pqn}} |V_{pqn}| \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{pqn}}{\partial V_{pq1}} |V_{pq1}| & \dots & \frac{\partial Q_{pqn}}{\partial V_{pqn}} |V_{pqn}| \end{bmatrix}$$

Paso 7: Calcular los elementos fuera de la diagonal

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = V_i(G_{ij} \text{sen} \theta_{ij} - B_{ij} \text{cos} \theta_{ij}) V_j$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -V_i(G_{ij} \text{sen} \theta_{ij} + B_{ij} \text{cos} \theta_{ij}) V_j$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} |V_j| = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} |V_j| = -\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j}$$

Paso 8: Calcular los elementos de la diagonal

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -Q_i - B_{ii} * V_i^2$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = P_i - G_{ii} * V_i^2$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} |V_j| = Q_i - B_{ii} * V_i^2$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} |V_j| = P_i + G_{ii} * V_i^2$$

Paso 9: Obtener el vector de correcciones

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta} & V * \frac{\partial \Delta P}{\partial V} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} & V * \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{(k)} * \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}^{(k+1)} = - \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(k)}$$

Paso 10: Cálculo de los nuevos δ y V

$$\begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix}^{(k)} + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}^{(k)}$$

Paso 11: Comparar los errores si cumple mostrar los resultados sino repite el paso 5.

$$|\Delta P_i^k| \leq \varepsilon = 0,001 \text{ y } |\Delta Q_i^k| \leq \varepsilon = 0.001.$$

Paso 12: Fin

2.2.2. Optimización por enjambre de partículas

La optimización por enjambre de partículas es un método de comportamiento social que es implementado para seleccionar el nodo de ubicación y la capacidad de la GD. Para esto se genera una población aleatoria con una posición y velocidad inicial también aleatorias, buscando llegar al óptimo deseado cumpliendo con las restricciones presentadas que limitan el espacio de búsqueda de las partículas [24], [39].

El grupo de partículas iniciales se evalúan en la función objetivo y así se puede obtener la mejor partícula de ese grupo que sería la líder, este proceso es repetido en cada iteración. Para la exploración y cambio de posición de las partículas se define la ecuación (8) conocida como la función de vuelo [6].

$$v_i^{k+1} = \omega * v_i^k + c_1 r_1 * (pbest_i - x_i^k) + c_2 r_2 * (gbest_i - x_i^k) \quad (8)$$

La actualización de la posición de cada partícula se simula mediante la ecuación (9) [44].

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (9)$$

La inercia de las partículas al explorar el espacio de búsqueda se da por la ecuación (10), resultando que al inicio el espacio de búsqueda sea amplio, pero al ir incrementando las iteraciones el espacio se vaya limitando, acercándose al óptimo, hasta llegar a la máxima iteración (condición de parada) [22].

$$\omega = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{iter_{max}} * iter \quad (10)$$

Algoritmo 2: Optimización por Enjambre de Partículas

- Paso 1:** Entrada de datos de líneas, generación y carga del sistema.
- Paso 2:** Calcular de flujo inicial aplicando Newton-Raphson.
- Paso 3:** Obtener las pérdidas totales de potencia mediante la ecuación (2).
- Paso 4:** Inicializar los datos del PSO (tamaño de la población y número máximo de iteraciones).
- Paso 5:** Crear la población con su posición y velocidad aleatoria para el tamaño y ubicación de las GD.

$$\text{Posición } x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{in})$$

$$\text{Velocidad } v_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{in})$$

- Paso 6:** Evaluar cada partícula en la función objetivo de la ecuación (1).
- Paso 7:** Inicializar cada partícula como la mejor partícula individual (Pbest).
- Paso 8:** Asignar la mejor partícula grupal (Gbest) a la mejor del grupo de Pbest.
- Paso 9:** Limitar dentro de los valores máximos y mínimos de potencia de inyección de GD por medio de (4).
- Paso 10:** Actualizar la velocidad de cada partícula y su posición con (8) y (9).

Paso 11: Evaluar la partícula actualizada en la función objetivo ecuación (1) y correr el flujo de potencia por NR.

Paso 12: Limitar dentro de los valores de voltajes (5) y minimización de pérdidas.

Paso 13: Actualizar la Pbest y Gbest.

Si $iter < iter_{max}$ regresa al paso 4, visualizar la solución óptima.

Paso 15: Fin

3. Resultados y discusión

La ubicación óptima de generación distribuida implementada por PSO mediante un flujo de potencia resuelto por Newton Raphson necesitó una selección de los nodos y la capacidad a ubicar de GD, ambas variables de salida necesitan una población determinada y un número máximo de iteraciones para llegar a la solución óptima, en la figura 3 se muestra el comportamiento de este grupo de partículas que varían al ir pasando las iteraciones propuestas, recorriendo el espacio de búsqueda hasta llegar a la mejor solución. En cada sistema y cada escenario de análisis de diferente número de GD a implementar se debió escoger el adecuado valor de estas variables para no incurrir en una búsqueda muy extensa ni tampoco tener un óptimo desde un inicio de la simulación, estos valores se muestran en las tablas 4 y 5 tanto para el sistema de 15 nodos como de 33 nodos.

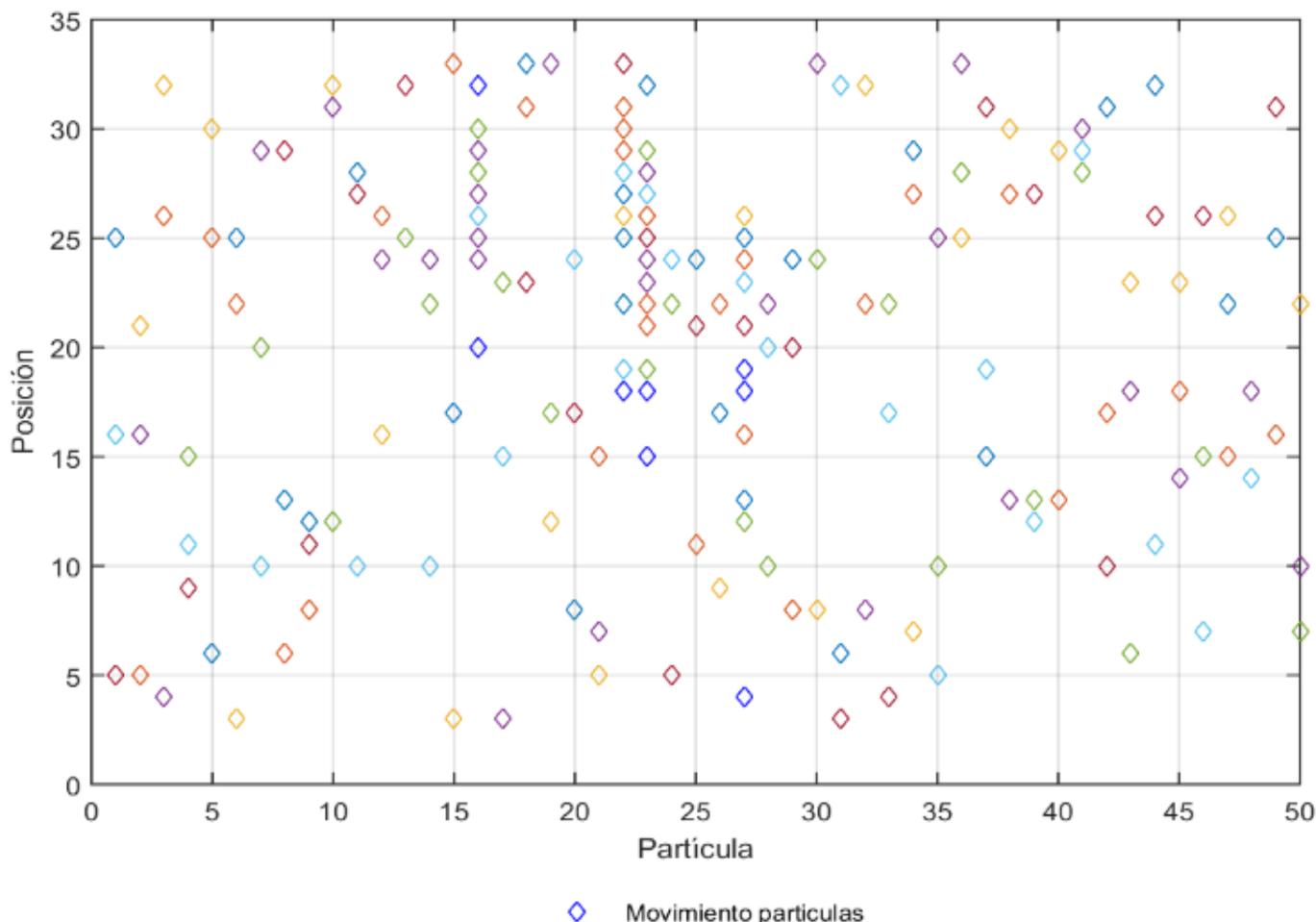


Figura 3. Movimiento de partículas en cada iteración del PSO.

Sistema de 15 nodos

Los resultados obtenidos en el sistema de 15 barras se muestran en la tabla 4, donde la ubicación es de 2 GD para evitar sobrecostos por implementar un número mayor de GD en un sistema relativamente pequeño. Las pérdidas fueron disminuidas en un 36.249 %, se logró un

valor de voltaje mínimo de 0.95 comprendido dentro de los límites propuestos. Estos resultados contribuyen a elevar los niveles de voltaje y minimizar las pérdidas de potencia activas y reactivas con respecto al caso base, evitando además la sobredimensión de generación que afectaría las condiciones de calidad y confiabilidad del sistema.

Tabla 4. Resultados de la optimización en el sistema de distribución radial de 15 nodos.

Resultados del algoritmo (15 nodos)		
Caso	Caso base	2 GD
Nodos con GD	-	4; 8
Capacidad GD (kW)	-	265; 350
Costos (USD)	-	1172615,864
Pérdidas (kW)	61,8027	39,3998

Reducción de Pérdidas (%)	-	36,249
Tiempo de ejecución (s)	-	5,15811
N° Población	-	50
Máxima Iteración	-	30
in Voltaje p.u	0,94454	0,9557
Max Desviación p.u	0,0555	0,0443
Desviación promedio de V p.u	0,0419	0,0309
Mínimo FP	0,7	0,4511

El perfil de voltajes mejorado es mostrado en la figura 4, donde se puede apreciar un mejoramiento en todos los nodos del sistema, obteniéndose una notable reducción de las desviaciones máxima y promedio del voltaje, resultados que son mostrados en la tabla 4.

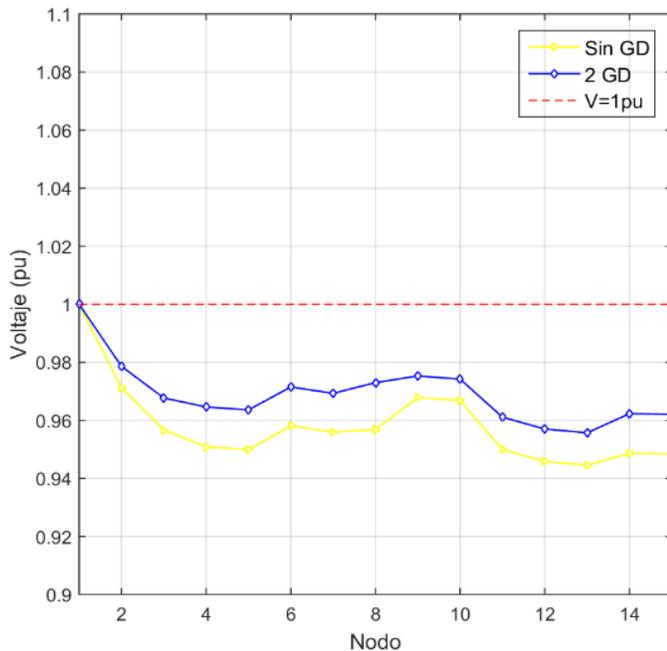


Figura 4. Perfil de voltajes en comparación caso base y con GD.

Sistema de 33 nodos

Los resultados obtenidos son satisfactorios en el sistema de 33 nodos. En la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos en reducción de pérdidas y se comparan con los resultados de 1, 2 y 3 generaciones instaladas, donde se puede evidenciar que con el aumento de puntos de generación en el sistema se logra disminuir en mayor medida las pérdidas totales del sistema, cumpliendo con el objetivo principal de lograrlo al menor costo posible. En la figura 5 se muestran las tres ubicaciones óptimas obtenidas.

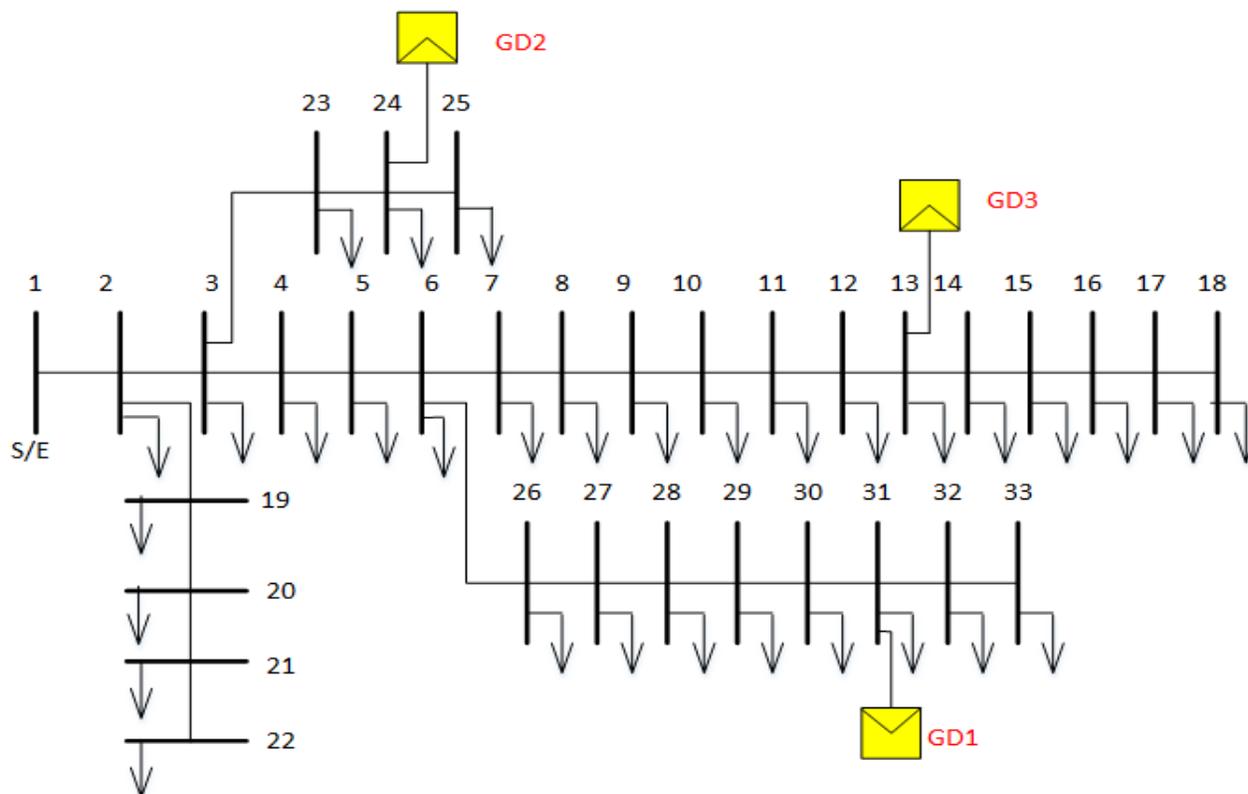


Figura 5. Ubicación de tres generaciones distribuidas en el sistema de distribución radial IEEE 33 nodos.

Tabla 5. Resultados de la optimización en el sistema de distribución radial de 33 nodos.

Resultados del algoritmo (33 nodos)				
Caso	Caso base	1 GD	2 GD	3 GD
Nodos con GD	-	10	30;12	31; 24; 13
Capacidad GD (kW)	-	1215	1025; 930	805;955;800
Costos (USD)	-	179597,50	229180,19	279269,21
Pérdidas (kW)	211,1965	125,2122	87,6950	75,1953
Reducción de Pérdidas (%)	-	40,7129	58,4771	64,3956
Tiempo de ejecución (s)	-	8,80703	17,0274	43,5564
Nº Población	-	30	40	50
Máxima Iteración	-	20	30	60
Mín Voltaje p.u	0,9037	0,9350	0,9620	0,9647
Max Desviación p.u	0,0963	0,0650	0,0380	0,0353
Desviación promedio de V p.u	0,0547	0,0317	0,0222	0,0220
FP sistema	0,85	0,74	0,62	0,46

Costos

El valor obtenido de costos se define como óptimo y que cumple con las restricciones de voltaje, pérdidas e inyección de potencia activa. En la figura 6 se puede observar la evolución del algoritmo en el tiempo y como varía en cada iteración la función objetivo hasta llegar al valor mínimo encontrado.

Analizando los costos, en el caso de 3 GD se puede ver que al llegar a la máxima iteración la función objetivo toma un valor de USD 279,269.21, los otros valores de costos en caso de 1 y 2 GD se muestran en la tabla 5.

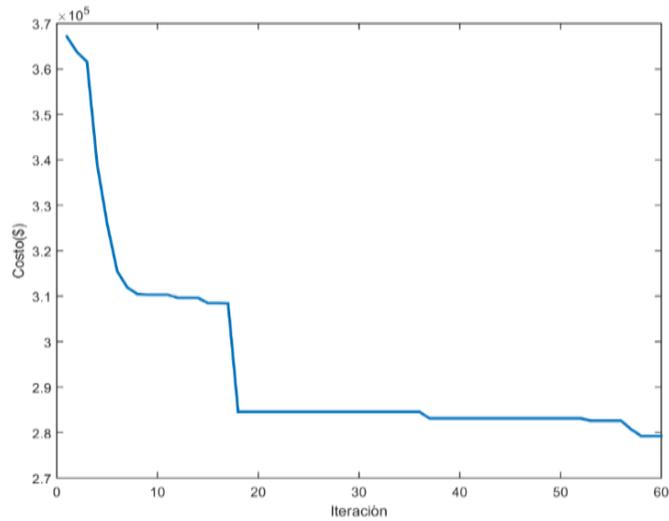


Figura 6. Variación de costos en función de las iteraciones del PSO.

Voltajes en los nodos

El perfil de voltaje es mejorado en el sistema de 33 nodos y este resultado se muestra en la figura 8 con

escenarios distintos de cantidades de puntos de generación a instalar. En esta figura 7 se puede apreciar una elevación del voltaje en todos los nodos del sistema, tanto para caso de única conexión de GD como para múltiple ubicación de GD. Todos los valores comparados de voltajes se muestran en la tabla 6. Como resultado más importante se resalta el escenario de 3 GD donde se logró un valor de voltaje mínimo de 0.9647 que es significativamente alto comparado al valor inicial de 0.9037 del caso base.

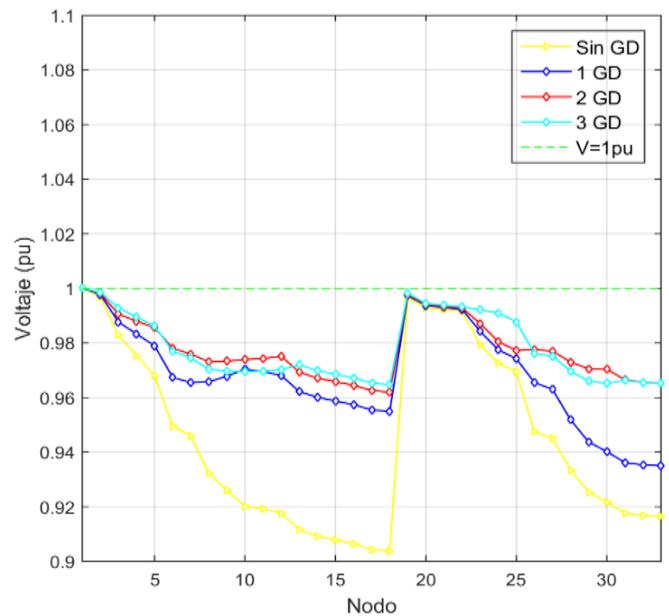


Figura 7. Perfiles de voltajes en comparación del caso base y con GD

Tabla 6. Comparación de voltajes obtenidos en Matlab y power factory del sistema de 15 y 33 nodos.

Voltajes p.u				
Nodo	Sin GD	1 GD	2 GD	3 GD
1	1	1	1	1
2	0,9970	0,9978	0,9982	0,9986
3	0,9829	0,9877	0,9906	0,9929
4	0,9754	0,9833	0,9880	0,9895
5	0,9679	0,9790	0,9856	0,9862
6	0,9495	0,9674	0,9781	0,9770
7	0,9459	0,9655	0,9759	0,9746
8	0,9323	0,9658	0,9731	0,9704
9	0,9259	0,9678	0,9733	0,9697
10	0,9201	0,9704	0,9739	0,9695
11	0,9192	0,9695	0,9743	0,9697
12	0,9177	0,9681	0,9751	0,9702
13	0,9115	0,9622	0,9693	0,9720
14	0,9092	0,9601	0,9671	0,9698
15	0,9078	0,9587	0,9658	0,9685
16	0,9064	0,9574	0,9645	0,9672
17	0,9043	0,9555	0,9626	0,9653
18	0,9037	0,9549	0,9620	0,9647
19	0,9965	0,9973	0,9977	0,9981
20	0,9929	0,9937	0,9941	0,9945
21	0,9922	0,9930	0,9934	0,9938
22	0,9916	0,9923	0,9928	0,9932
23	0,9793	0,9842	0,9871	0,9921
24	0,9726	0,9775	0,9805	0,9910
25	0,9693	0,9742	0,9772	0,9877
26	0,9475	0,9655	0,9776	0,9762
27	0,9450	0,9630	0,9770	0,9752
28	0,9335	0,9518	0,9730	0,9697
29	0,9253	0,9437	0,9705	0,9660
30	0,9217	0,9402	0,9704	0,9652
31	0,9176	0,9362	0,9665	0,9663
32	0,9167	0,9353	0,9656	0,9655
33	0,9164	0,9350	0,9653	0,9652

Desviaciones de voltajes

Las desviaciones de voltajes mostradas en la figura 8, son indicadores del mejoramiento del perfil de voltaje obtenido. Se puede evidenciar el mejor resultado con la

ubicación de 3 GD, resultando una desviación promedio de 0.0220 y un valor de máxima desviación reducido a 0.0353. Estos valores para los otros casos pueden ser encontrados en la tabla 5.

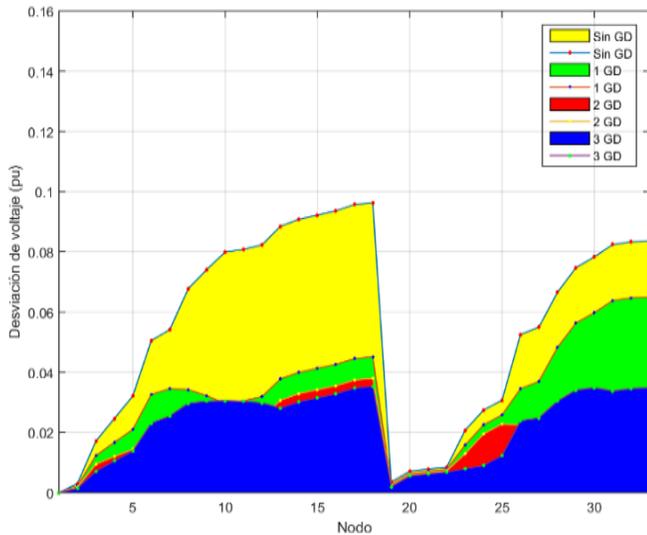


Figura 8. Desviaciones de voltajes en cada nodo, comparación del caso base y casos con GD.

Pérdidas de potencia activa

Las pérdidas de potencia mostradas en la figura 9, demuestran que al incluir GD de inyección de potencia activa los flujos en las líneas en comparación al caso de una generación centralizada se liberan y por consecuencia en cada línea existe una disminución de los flujos de corrientes, deparando en que las pérdidas totales del sistema disminuyen, en el caso de 3 GD a un valor de 75.1953kW, que representa una reducción de 64.3956% de las pérdidas de potencia activa. El resto de los resultados para los otros casos se encuentran en la tabla 5.

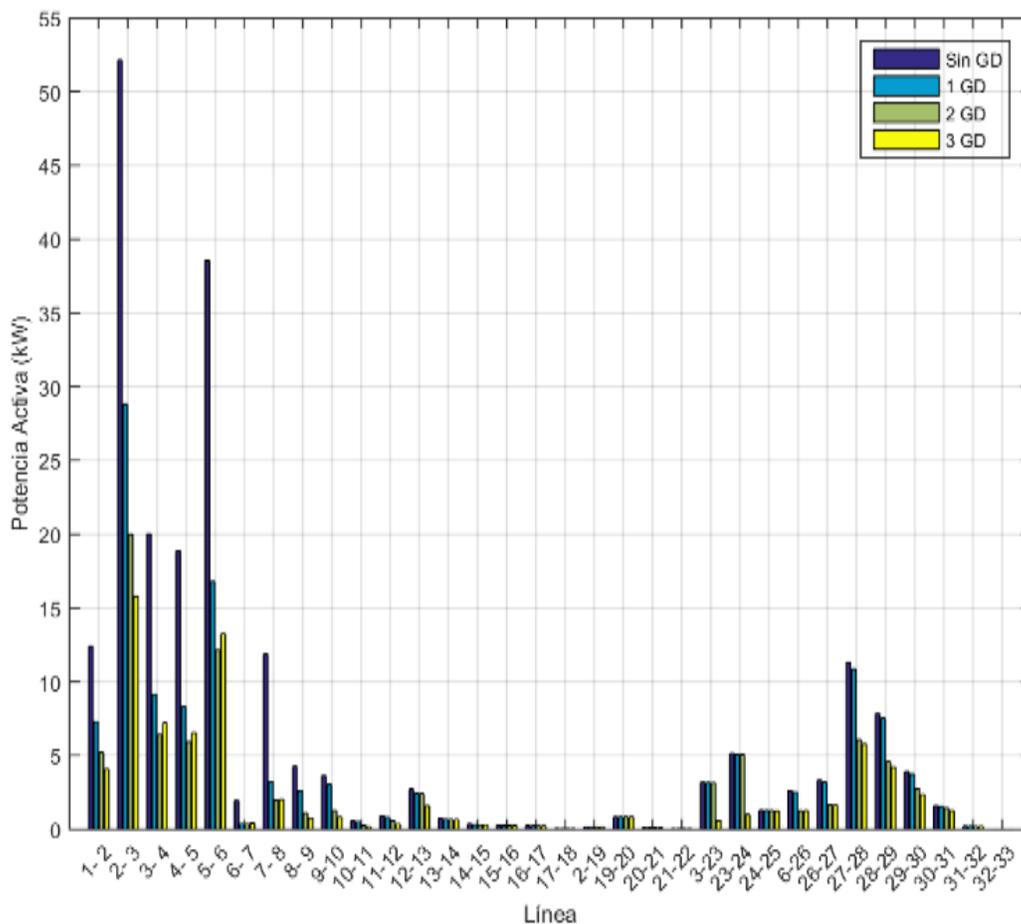


Figura 9. Pérdidas de potencia activa en cada línea, comparación caso base y con GD.

Pérdidas de potencia reactiva

La figura 10 muestra los valores de pérdidas de potencias reactivas en cada línea, lo que evidencia que solo con la selección de conexión de una sola GD con inyección única de potencia activa se logran reducir los

flujos de corrientes y las distancias de circulación lo cual además de la reducción de pérdidas de potencia activa brinda una disminución de las pérdidas de potencia reactiva.

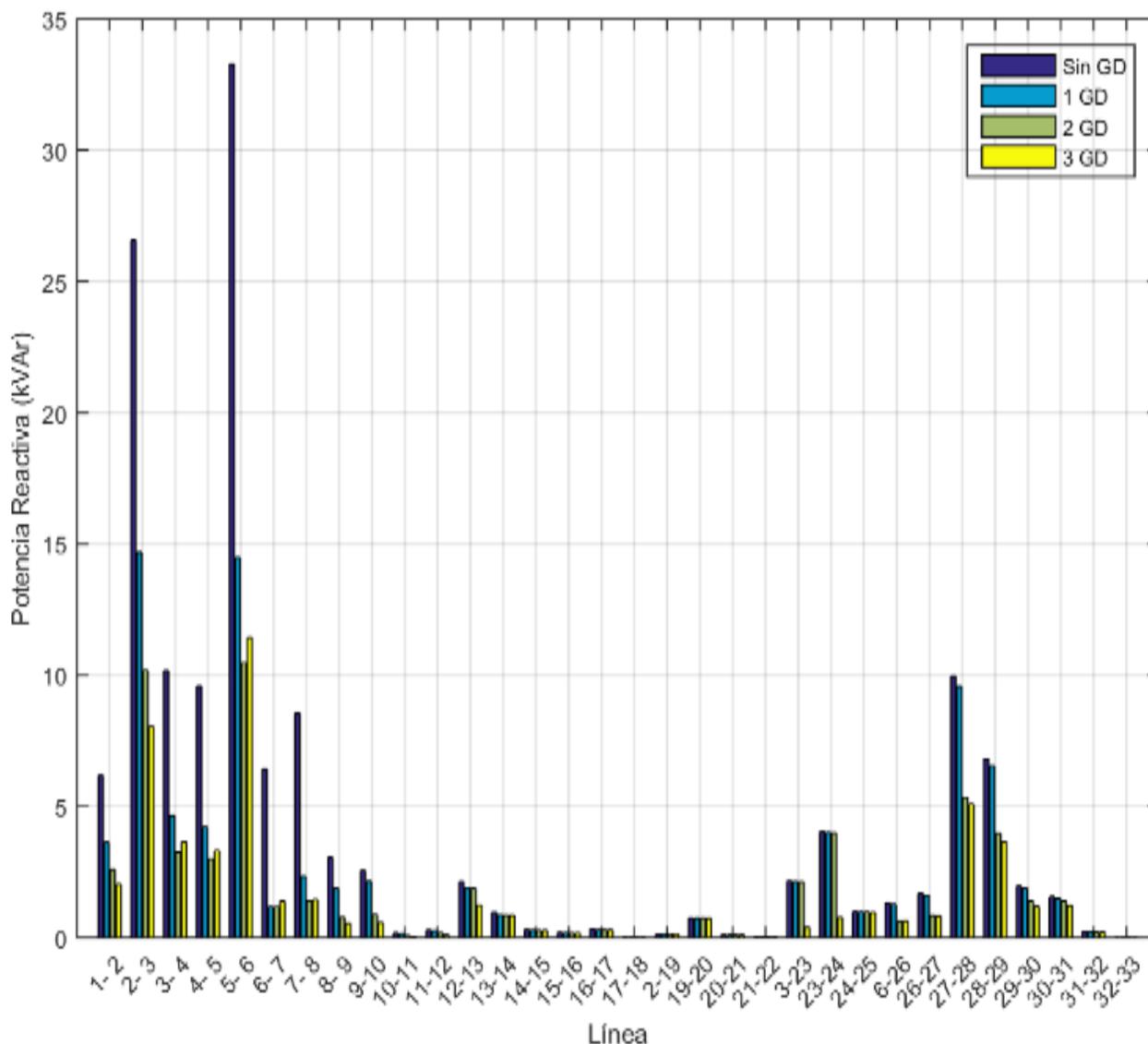


Figura 10. Pérdidas de potencia reactiva en cada línea, comparación caso base y con GD.

Factor de potencia

El factor de potencia en cada nodo se muestra en la figura 11, donde se puede apreciar una clara disminución en el nodo de conexión a la red, debido a tener solo implementación de generación activa, que hace que

aumente el ángulo del triángulo de potencias por tener una potencia reactiva casi constante para lo cual el factor de potencia disminuye. Los resultados se muestran en la tabla 5.

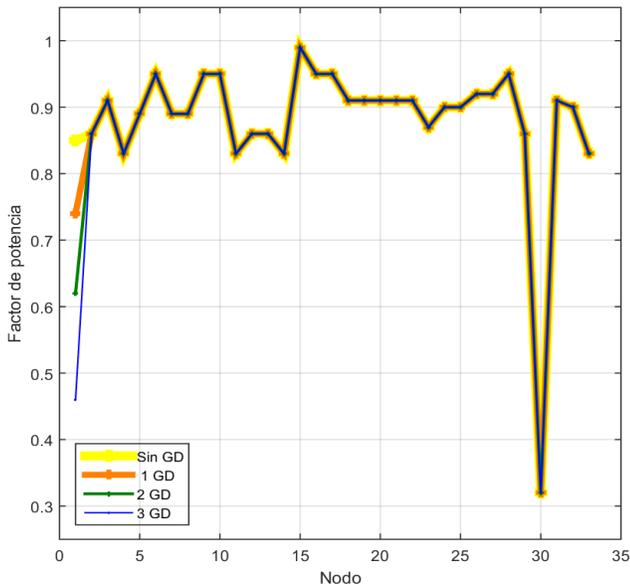


Figura 11. Factor de potencia en cada nodo, comparación caso base y con GD.

4. Conclusiones

En este trabajo se implementó la ubicación óptima, selección y dimensionamiento de generación distribuida fotovoltaica en sistemas de distribución radiales con restricción de única y múltiple conexión de generación. Con la metodología propuesta se logró minimizar las pérdidas del sistema y mejorar el perfil de voltajes, cumpliendo con el criterio de mínimo costo como el principal objetivo propuesto. El flujo de potencia calculado en Matlab fue corroborado con simulaciones en DIGSILENT Power Factory aplicando el método de Newton Raphson completo, obteniendo los resultados de las potencias activas y reactivas, voltajes en los nodos y pérdidas totales del sistema.

El modelo para la optimización de los flujos de potencias en redes de distribución basado en la ubicación óptima y dimensionamiento de la GD permitió obtener novedosos e importantes resultados de mejoras en las variables de análisis.

Se definieron escenarios de estudios mediante restricciones de la cantidad de generaciones a conectar y se lograron resultados muy importantes en el mejoramiento de los perfiles de voltaje y la reducción de las pérdidas. La metodología propuesta es genérica y puede ser aplicada en cualquier sistema eléctrico de potencia.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a el colectivo de docentes y estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica / Electricidad en la Universidad Politécnica Salesiana de la sede Quito. Agradecemos también al Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes (GIREI) dentro del cual se ha desarrollado esta investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores y el trabajo presentado no presentan conflictos de intereses con ningún patrocinador o agencia con interés en los resultados del proyecto.

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

D. González y A. Águila contribuyeron en la investigación, experimentación, así como en la conceptualización, preparación y corrección del artículo con un aporte en el 100 % del trabajo. G. Gutiérrez y L. Ortiz contribuyeron con la preparación y corrección del artículo con un aporte en el 50 % del trabajo.

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] S. K. Saha, S. Banerjee, D. Maity, and C. K. Chanda, "Optimal Sizing and Location Determination of Distributed Generation in Distribution Networks," pp. 1–5, 2015.
- [2] M. Gandomkar, M. Vakilian, and M. Ehsan, "Optimal distributed generation allocation in distribution network using Hereford Ranch algorithm," *2005 Int. Conf. Electr. Mach. Syst.*, vol. 2, p. 916–918 Vol. 2, 2005.
- [3] S. Jain, S. Kalambe, G. Agnihotri, and A. Mishra, "Distributed generation deployment: State-of-the-art of distribution system planning in sustainable era," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, no. April, pp. 363–385, 2017.
- [4] A. Bayat, A. Bagheri, and R. Noroozian, "Optimal siting and sizing of distributed generation accompanied by reconfiguration of distribution networks for maximum loss reduction by using a new UVDA-based heuristic method," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 77, pp. 360–371, 2016.
- [5] O. D. Montoya, S. Member, A. Grajales, A. Garces, S. Member, and C. A. Castro, "Distribution Systems Operation Considering Energy Storage Devices and Distributed Generation," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 5, pp. 890–

- 900, 2017.
- [6] D. B. Prakash and C. Lakshminarayana, "Multiple DG Placements in Distribution System for Power Loss Reduction Using PSO Algorithm," *Procedia Technol.*, vol. 25, no. Raerest, pp. 785–792, 2016.
- [7] A. Águila Téllez, G. López, I. Isaac, and J. W. González, "Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review," *Heliyon*, vol. 4, no. 8, p. e00746, Aug. 2018.
- [8] M. Jamil and A. S. Anees, "Optimal sizing and location of SPV (solar photovoltaic) based MLDG (multiple location distributed generator) in distribution system for loss reduction, voltage profile improvement with economical benefits," *Energy*, vol. 103, pp. 231–239, 2016.
- [9] L. Ortiz-Matos, A. Aguila-Tellez, R. C. Hincapié-Reyes, and J. W. González-Sanchez, "Multi-Criteria Optimization of the Deployment of a Grid for Rural Electrification Based on a Heuristic Method," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 73, no. 1, p. 012020, Jul. 2017.
- [10] P. D. Prasad, V. C. V. Reddy, and T. G. Manohar, "Optimal renewable resources placement in distribution networks by combined power loss index and whale optimization algorithms," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, 2017.
- [11] U. Sultana, A. B. Khairuddin, A. S. Mokhtar, N. Zareen, and B. Sultana, "Grey wolf optimizer based placement and sizing of multiple distributed generation in the distribution system," *Energy*, vol. 111, pp. 525–536, 2016.
- [12] M. Bazrafshan and N. Gatsis, "Placing and sizing distributed photovoltaic generators for optimal reactive power compensation," *2015 IEEE Glob. Conf. Signal Inf. Process. Glob. 2015*, pp. 1136–1140, 2016.
- [13] J. H. Angelim and C. M. Affonso, "Impact of distributed generation technology and location on power system voltage stability," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 4, pp. 1758–1764, 2016.
- [14] I. A. Mohamed and M. Kowsalya, "Optimal size and siting of multiple distributed generators in distribution system using bacterial foraging optimization," *Swarm Evol. Comput.*, vol. 15, pp. 58–65, 2014.
- [15] H. Doagou-mojarrad, G. B. Gharehpetian, H. Rastegar, and J. Olamaei, "Optimal placement and sizing of DG (distributed generation) units in distribution networks by novel hybrid evolutionary algorithm," *Energy*, vol. 54, pp. 129–138, 2013.
- [16] C. G. Tarôco, R. H. C. Takahashi, and E. G. Carrano, "Multiobjective planning of power distribution networks with facility location for distributed generation," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 141, pp. 562–571, 2016.
- [17] P. S. Georgilakis and N. D. Hatziargyriou, "Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3420–3428, Aug. 2013.
- [18] P. V. Babu and S. P. Singh, "Optimal Placement of DG in Distribution network for Power loss minimization using NLP & PLS Technique," *Energy Procedia*, vol. 90, no. December 2015, pp. 441–454, 2016.
- [19] S. Kaur, G. Kumbhar, and J. Sharma, "A MINLP technique for optimal placement of multiple DG units in distribution systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 609–617, 2014.
- [20] A. Uniyal and A. Kumar, "Comparison of optimal DG placement using CSA, GSA, PSO and GA for minimum real power loss in radial distribution system Ankit," *2016 IEEE 6th Int. Conf. Power Syst. ICPS 2016*, pp. 1–6, 2016.
- [21] D. B. Prakash and C. Lakshminarayana, "Multiple DG Placements in Distribution System for Power Loss Reduction Using PSO Algorithm," *Procedia Technol.*, vol. 25, no. Raerest, pp. 785–792, 2016.
- [22] S. Motiian, M. Aghababaie, and H. Soltanian-Zadeh, "Particle Swarm Optimization (PSO) of Power Allocation in Cognitive Radio Systems with Interference Constraints," *4th IEEE Int. Conf. Broadband Netw. Multimed. Technol.*, pp. 558–562, 2011.
- [23] H. a. M. Prasanna, M. V. L. Kumar, a. G. Veerasha, T. Ananthapadmanabha, and a. D. Kulkarni, "Multi objective optimal allocation of a distributed generation unit in distribution network using PSO," *2014 Int. Conf. Adv. Energy Convers. Technol.*, pp. 61–66, 2014.
- [24] S. Kumar, K. K. Mandal, and N. Chakraborty, "Comparative Performance Study of Various PSO Techniques for Multiple Allocations of DG Units in Radial Distribution System," *2015 IEEE Power, Commun. Inf. Technol. Conf. PCITC 2015 - Proc.*, pp. 878–883, 2016.
- [25] M. Farasat, S. Mehraeen, A. Arabali, and A. Trzynadlowski, "GA-based optimal power flow for microgrids with DC distribution network," in *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015, pp. 3372–3379.
- [26] K. Mistry, "MSFL Based Determination of Optimal Size and Location of Distributed Generation in Radial Distribution System," pp. 530–535, 2016.
- [27] M. Dixit, P. Kundu, and H. R. Jariwala, "Optimal placement and sizing of DG in Distribution system using Artificial Bee Colony Algorithm," in *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, 2016, pp. 1–6.
- [28] R. Prakash and B. C. Sujatha, "Optimal placement and sizing of DG for power loss minimization and VSI improvement using bat algorithm," *2016 Natl. Power Syst. Conf. NPSC 2016*, 2017.
- [29] E. S. Ali, S. M. Abd Elazim, and A. Y. Abdelaziz, "Ant Lion Optimization Algorithm for optimal location and sizing of renewable distributed generations," *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 1311–1324, Feb. 2017.
- [30] D. Rama Prabha and T. Jayabarathi, "Optimal placement and sizing of multiple distributed generating units in distribution networks by invasive weed optimization

- algorithm,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 7, no. 2, pp. 683–694, 2016.
- [31] P. Dinakara Prasad Reddy, V. C. Veera Reddy, and T. Gowri Manohar, “Ant Lion optimization algorithm for optimal sizing of renewable energy resources for loss reduction in distribution systems,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, pp. 1–18, 2017.
- [32] O. Amanifar, “Optimal Distributed Generation Placement and Sizing for Loss and THD Reduction and Voltage Profile Improvement in Distribution Systems Using Particle Swarm Optimization and sensitivity analysis,” *Electr. Power Distrib. Networks (EPDC), 2011 16th Conf.*, pp. 1–7, 2011.
- [33] A. M. Imran, M. Kowsalya, and D. P. Kothari, “A novel integration technique for optimal network reconfiguration and distributed generation placement in power distribution networks,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 461–472, 2014.
- [34] S. Kansal, V. Kumar, and B. Tyagi, “Hybrid approach for optimal placement of multiple DGs of multiple types in distribution networks,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 75, pp. 226–235, 2016.
- [35] O. Amanifar and M. E. H. Golshan, “Optimal DG allocation and sizing for mitigating voltage sag in distribution systems with respect to economic consideration using Particle Swarm Optimization,” *2012 Proc. 17th Conf. Electr. Power Distrib. EPDC 2012*, 2012.
- [36] A. A. Tellez, D. F. C. Galarza, and L. O. Matos, “Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 7, pp. 2190–2194, 2015.
- [37] B. Mahdad and K. Srairi, “Adaptive differential search algorithm for optimal location of distributed generation in the presence of SVC for power loss reduction in distribution system,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 19, no. 3, pp. 1266–1282, 2016.
- [38] A. Aguila and J. Wilson, “Technical and Economic Assessment of the Implementation of Measures for Reducing Energy Losses in Distribution Systems,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 73, no. 1, p. 012018, Jul. 2017.
- [39] G. Niazi and M. Lalwani, “PSO Based Optimal Distributed Generation Placement and Sizing in Power Distribution Networks : A Comprehensive Review,” no. 1, pp. 305–311, 2017.
- [40] F. Castillo, A. Aguila, J. González, and S. Member, “Analysis of Stability of Tension and Losses of Electric Power in Distribution Networks with Distributed Generation,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 11, pp. 4491–4498, 2016.
- [41] K. Muthukumar and S. Jayalalitha, “Optimal placement and sizing of distributed generators and shunt capacitors for power loss minimization in radial distribution networks using hybrid heuristic search optimization technique,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 78, pp. 299–319, 2016.
- [42] O. Badran, H. Mokhlis, S. Mekhilef, W. Dahalan, and J. Jallad, “Minimum switching losses for solving distribution NR problem with distributed generation,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 8, pp. 1790–1801, 2018.
- [43] S. Devi and M. Geethanjali, “Application of Modified Bacterial Foraging Optimization algorithm for optimal placement and sizing of Distributed Generation,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 41, no. 6, pp. 2772–2781, 2014.
- [44] J. S. de Souza, Y. P. Molina, C. S. de Araujo, and ..., “Modified Particle Swarm Optimization Algorithm for Sizing Photovoltaic System,” *IEEE Lat. Am.*, vol. 15, no. 2, pp. 283–289, 2017.



Estrés en la aviación, un problema de salud ocupacional que requiere una adecuada gestión de recursos de la tripulación: una revisión

Stress in aviation, an occupational health problem that requires proper crew resource management: a review

Reyna M. Vergara-Montenegro^{1*} , Israel Ríos-Castillo² 

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, Departamento de Orientación Psicológica, Panamá

² Universidad Especializada de las Américas (UDELAS), Decanato de Postgrado, Panamá

reyna.vergara@utp.ac.pa; israel.rios.1529@udelas.ac.pa

Fecha de recepción: 14 de marzo de 2022; Fecha de aprobación: 24 de junio de 2022.

*Autor de correspondencia: Reyna M. Vergara-Montenegro (reyna.vergara@utp.ac.pa)

RESUMEN. El objetivo de la presente revisión es analizar la literatura relacionada el estrés y sus fuentes generadoras en la aviación, un tema poco estudiado en Panamá. Además, el trabajo busca describir las medidas que se están implementando en la aviación para disminuir los errores humanos en los accidentes aéreos. La presente revisión se realizó desde diciembre 2021 a enero 2022. Se consultaron las bases de datos MEDLINE, Google Scholar y Scielo, empleando descriptores clave como estrés, aviación, salud ocupacional, accidentes aéreos, entre otros. La revisión arrojó hallazgos relacionados con el estrés laboral como problema de salud creciente en los países en vías de desarrollo. Las profesiones relacionadas con la aviación tienden a sufrir de estrés laboral y otras afecciones psicológicas, debido a múltiples factores como la presión laboral, la ansiedad y aquellos relacionados con la responsabilidad por el trabajo desempeñado. Las organizaciones internacionales de aviación han implementado protocolos detallados para tratar de disminuir el factor humano dentro de los accidentes aéreos. El protocolo más utilizado es *Crew Resource Management*, que contribuye a la adecuada utilización de las máquinas y el recurso humano. En conclusión, las responsabilidades de los profesionales de la aviación, no solo consigo mismos y con la institución para la cual laboran, sino también con los pasajeros que transportan, les producen un aumento de estrés. Por lo que resulta importante brindar a estos profesionales terapias psicológicas efectivas para que reconozcan y puedan disminuir sus niveles de estrés. Además, se requieren abordaje desde las políticas públicas de salud ocupacional para tratar el estrés laboral, sobre todo en actividades de alto riesgo como la aviación.

Palabras clave. *Aeronáutica, accidente, aviación, estrés, fatiga.*

ABSTRACT. The objective of this review is to analyse the literature related to stress and its generating sources in aviation, an area with few studied in Panama. In addition, the work seeks to describe the measures that are being implemented in aviation to reduce human errors in air accidents. This review was carried out from December 2021 to January 2022. The MEDLINE, Google Scholar and Scielo databases were consulted, using key descriptors such as stress, aviation, occupational health, air accidents, among others. The review produced findings related to job stress as a growing health problem in developing countries. Aviation-related professions tend to suffer from job stress and other psychological conditions, due to multiple factors such as work pressure, anxiety and those related to the responsibility for the work performed. International aviation organizations have implemented detailed protocols to try to reduce the human factor in air accidents. The most widely used protocol is *Crew Resource Management*, which contributes to the proper use of machines and human resources. In conclusion, the responsibilities of aviation professionals, not only with themselves and with the institution for which they work, but also with the passengers they transport, cause them increased stress. Therefore, it is important to provide these professionals with effective psychological therapies so that they recognize how to reduce their stress levels. In addition, an approach from occupational health public policies is required to treat work stress, especially in high-risk activities such as aviation.

Keywords. *Aeronautics, accident, aviation, stress, fatigue.*

1. Introducción

El estrés es una condición que afecta el desempeño físico y mental, pudiendo ser crítico en ambientes de trabajo de alto riesgo para la vida [1], [2]. Junto con la depresión y la ansiedad, el estrés ocasiona discapacidad y persiste como problema de salud pública en los países en vías de desarrollo [3-5]. El estrés en el trabajo ocasiona afecciones psicológicas, emocionales, cognitivas y conductuales [6], [7].

El estrés ha jugado un papel fundamental en la supervivencia del hombre, debido a que cierto grado de estrés es necesario para ponerse en marcha y escapar ante situaciones de peligro [8,9]. Cuando el estrés sobrepasa los límites, es cuando se convierte en un problema de salud, ya que tiene múltiples efectos negativos en lo físico, psicológico, laboral, académico, familiar y social, pudiendo ocasionar preocupación, angustia y otros trastornos personales y biológicos [8].

El estrés en la aviación, por tanto, debe ser priorizado para la atención de salud mental en el marco de las políticas y programas de salud ocupacional [10-12]. El manejo adecuado del estrés, tanto del piloto como de la tripulación, es clave para prevenir accidentes [13], [14]. Muchos de los profesionales del medio aeronáutico padecen esta condición, sobre todo debido a estresores asociados directamente con el trabajo [15], [16]. Algunos elementos estresores incluyen las condiciones ergonómicas vinculadas con la velocidad, la presión, el ruido, la carga cognitiva, el time stress, la fatiga, el jet-lag, entre otros [16], [17]. En el campo de la aviación, muchos de los accidentes aéreos se deben en gran medida errores humanos [18], [19]. La referencia [20] señala que los accidentes aeronáuticos se deben principalmente a factores físicos, ambientales y humanos.

El objetivo de esta revisión es analizar la literatura relacionada con el estrés y sus fuentes generadoras en el campo de la aviación, así como conocer cuáles son las medidas programáticas y los tratamientos que se están implementando en la industria de la aeronáutica para disminuir los errores humanos en los accidentes de aviación, los cuales cada año cobran vidas humanas y pérdidas económicas significativas. Para alcanzar el objetivo propuesto, la presente revisión está estructurada de manera que se puedan abordar temas importantes como lo son las generalidades del estrés; ¿Cómo es el

estrés en el campo de la aviación?; ¿Cuáles son las consecuencias que se presentan en la aviación a causa del estrés?; y, ¿A qué se refiere el programa de Gestión de Recursos de la Tripulación? (CRM, por sus siglas en inglés).

1.1. Generalidades del estrés

El término estrés es conocido a nivel mundial debido a la gran cantidad de personas que lo padecen. Se estima que, de todas las consultas médicas en personas de menos de 60 años, el 70% se relacionan con agotamiento en el trabajo [21]. Lo que ha llevado a considerar al estrés como la enfermedad del siglo veinte [11]. Por lo tanto, esta condición es motivo de preocupación en ambientes de trabajos de alto riesgo como lo sería en la aviación.

El estrés ocasiona un estado de crisis que influye en las relaciones personales, generando irritabilidad, agresividad y fatiga, así como múltiples efectos en lo laboral, familiar y social [14], [21]. Es así que se ha considerado al estrés como una respuesta orgánica a condiciones externas que perturban el equilibrio psicológico del individuo [9]. Tanto las anteriores definiciones como la mayoría de los autores que tratan sobre el tema tienen en común el hecho de que el estrés es una respuesta de nuestro organismo para hacerle frente a una situación amenazante, la cual permite la supervivencia. En muchas ocasiones, el estrés ayuda a estar alertas y activar la fuga o escape ante alguna situación que implique peligro, pero cuando sobrepasa los límites, este se convierte en un problema de salud serio. Por lo que, aprender a manejar el estrés o buscar atención especializada debería ser la primera opción para tratarlo.

Según la referencia [22], el estrés genera cuadros de ansiedad y depresión. Este mismo autor menciona que el estrés se puede manifestar en respuestas de tipo biológico, cognitivo y conductual [22]. También, las respuestas del estrés se centran en las áreas cognitiva, emotiva y conductual [23], [24]. Los síntomas más comunes del estrés en el área cognitiva afectan la concentración y atención, la memoria, las reacciones inmediatas, los errores, la evaluación actual, proyección futura, la lógica y la organización del pensamiento [25]. En el área emotiva (sentimientos y emociones) se afectan mayormente la tensión, la hipocondría, los rasgos de personalidad, la ética, depresión y desánimo y la

autoestima. Mientras que, en el área conductual, las afectaciones se dan en el área del lenguaje, los intereses, las ausencias, estimulantes, energía, sueño, relaciones, cambios en la conducta e incluso el suicidio [25].

1.2. Estrés en el campo de la aviación

Las consecuencias del estrés en la aviación son motivo de preocupación. La aviación ocupa el tercer lugar de las profesiones más estresantes según el Instituto de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Manchester [26]. La aviación se caracteriza por una serie de tareas especialmente complejas como la de ser responsable de la seguridad de la operación del avión y de sus ocupantes; contar con la autoridad para dar todas las órdenes que juzgue necesarias con el propósito de afianzar la seguridad del avión, las personas o sus propiedades; o asegurarse que el peso del avión y el mantenimiento del equilibrio están dentro de los límites calculados para operar; entre otras tantas tareas generadoras de estrés [26]. Es fácil comprender por qué, según el Manual de gestión de la seguridad operacional de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) (2006), de cada cuatro accidentes aéreos, tres son por causa de errores humanos, en los cuales se identifican a individuos aparentemente sanos y con las calificaciones apropiadas que no pudieron actuar de manera óptima debido al peso de los factores organizacionales que determinan la calidad y la carga de trabajo, estos últimos influyen en la toma de decisiones inmediatas [26].

1.3. Consecuencias del estrés en la aviación

El estrés en la aeronáutica puede tener consecuencias graves en cuanto a la seguridad aérea, ya que este afecta la conciencia situacional y las habilidades de la tripulación [27], [28]. Al respecto, la referencia [29] señala que los factores humanos tratan las relaciones entre las personas, en su vida y su trabajo; sobre sus relaciones con las máquinas, con los procedimientos y con el entorno que les rodea; y, también, sobre sus relaciones con otras personas.

El factor humano es el responsable en gran medida de los pocos accidentes aéreos que se registran [30]. Asimismo, el factor humano es el criterio más sensible y vulnerable, dada su naturaleza y en la medida que el piloto aeronáutico debe responder a toda una multidimensionalidad de condiciones que cursan en el

orden de lo psicológico y lo fisiológico, es decir, lo biopsicosocial [20]. Según la Agencia Federal de Administración de la Aviación (FAA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos de América, aproximadamente entre un 70% y 80% de los accidentes aéreos son a causa de errores humanos [31].

Entre las fuentes más comunes de errores en el mantenimiento de la aviación están la falta de comunicación, la complacencia, la falta de conocimiento, la distracción, la falta de trabajo en equipo, la fatiga, la falta de recursos, la presión, la falta de asertividad, la falta de conciencia, las pautas y el estrés [32], [33]. El principal error que supone un desencadenante para un accidente aéreo viene dado por fallas en el desarrollo de las actividades del personal cualificado [32], [33].

1.4. Gestión de recursos de la tripulación (CRM, Crew Resource Management)

La gestión de recursos de la tripulación o CRM, por sus siglas en inglés, ha sido diseñada para responder programáticamente ante una serie de errores operacionales en la aviación [27]. Como se ha señalado anteriormente, con respecto al tema de los factores humanos en la aviación, el CRM es una de las herramientas desarrolladas para prevenir los errores de pilotaje en accidentes de aviación [27]. Para lo cual, se han creado programas de entrenamiento en CRM, lo que ha permitido minimizar el error humano y optimizar la ejecución a través de la utilización de todos los recursos disponibles [28].

La herramienta CRM se preocupa principalmente de las habilidades blandas, de los aspectos cognitivos e interpersonales, necesarios para desarrollar una operación de vuelo, bajo situaciones de estrés, con una alta carga de trabajo, en ambientes y entornos complejos y con una clara autoridad y organización jerárquica, siendo fundamental la aptitud del líder y su estilo de liderazgo [34].

Por lo que, el programa CRM se ocupa de prevenir, administrar y reducir al mínimo los errores humanos en la aviación [35]. Además, las estadísticas muestran que, a partir de la implementación de los programas de entrenamiento en CRM, se han disminuido la cantidad de accidentes aéreos [35]. Es clave, por tanto, que el programa CRM sea parte de las políticas de salud ocupacional para el manejo del estrés en la aviación.

Asimismo, se debe considerar el trabajo multidisciplinario en salud ocupacional para esta actividad laboral de alto riesgo.

2. Conclusiones

El estrés afecta en gran medida a la ocurrencia de errores en la aviación, lo que puede generar consecuencias negativas, entre estos, accidentes aéreos. El estrés es un factor muy importante en el campo de la aviación, debido a que sus efectos tienen repercusiones negativas, no solo en el individuo como tal, sino también en su familia, la organización a la que pertenece y a la sociedad en general. Estas consecuencias negativas han generado que organismos internacionales unan esfuerzos para disminuir estos efectos, por lo que se ha diseñado el programa CRM, que ha mostrado tener buenos resultados en la disminución del error humano, que es responsable de daños y pérdidas significativas.

El abordaje del estrés en el personal aeronáutico requiere el desarrollo de nuevos programas que, sumados al mencionado CRM, puedan contribuir a disminuir aún más la cantidad de accidentes aéreos. Las estrategias psicológicas resultarían de gran beneficio para estos profesionales, ya que el personal aeronáutico sería capaz de identificar y disminuir sus niveles de estrés y poder así ejercer su profesión de una manera más eficiente y eficaz, disminuyendo los riesgos de accidentes aéreos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo del Departamento de Orientación Psicológica, Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) y del Decanato de Postgrado, Universidad Especializada de las Américas (UDELAS).

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores se declaran libres de conflictos de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

RV concibió la idea principal, RV e IR-C prepararon el manuscrito, realizaron la revisión de calidad y versión final del mismo. Los autores revisaron y aprobaron la versión final del manuscrito.

REFERENCIAS

- [1] I.-S. Ryu, D.-S. Jeong, I.-A. Kim, J.-H. Roh y J.-U. Won, "Association between Job Stress, Psychosocial Well-being and Presenteeism, Absenteeism: Focusing on Railroad Workers", *Korean Journal of Occupational and Environmental Medicine*, vol. 24, n. ° 3, p. 263, 2012. <https://doi.org/10.35371/kjoem.2012.24.3.263>
- [2] J. Cahill, P. Cullen, S. Anwer, K. Gaynor y S. Wilson, "The Requirements for New Tools for Use by Pilots and the Aviation Industry to Manage Risks Pertaining to Work-Related Stress (WRS) and Wellbeing, and the Ensuing Impact on Performance and Safety", *Technologies*, vol. 8, n. ° 3, p. 40, 2020. <https://doi.org/10.3390/technologies8030040>
- [3] S. Hatcher, "Risk Management in Mental Health: Applying Lessons from Commercial Aviation", *Australasian Psychiatry*, vol. 18, n. ° 1, pp. 4-6, 2010. <https://doi.org/10.3109/10398560903180125>
- [4] C. Baudin, M. Lefèvre, P. Champelovier, J. Lambert, B. Laumon y A.-S. Evrard, "Aircraft Noise and Psychological Ill-Health: The Results of a Cross-Sectional Study in France", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15, n. ° 8, p. 1642, 2018. <https://doi.org/10.3390/ijerph15081642>
- [5] World Health Organization, "Mental health", Geneva, 2021. <https://www.who.int/es/health-topics/mental-health>
- [6] K. Martin, E. McLeod, J. Périard, B. Rattray, R. Keegan y D. B. Pyne, "The Impact of Environmental Stress on Cognitive Performance: A Systematic Review", *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 61, n. ° 8, pp. 1205-1246, 2019. <https://doi.org/10.1177/0018720819839817>
- [7] World Health Organization, "Raising awareness of stress at work in developing countries: advice to employers and worker representatives", Geneva, 2008.
- [8] V. Coleman, *Cómo superar el estrés: Trucos prácticos para no dejarse vencer por el ritmo de vida actual*. Girona, España: Tikal Ediciones, 1995.
- [9] M. Barradas et al., *Estrés y burnout enfermedades en la vida actual*. Bloomington, IN: Palibrio, 2018.
- [10] S. Hatcher, "Risk Management in Mental Health: Applying Lessons From Commercial Aviation", *Australasian Psychiatry*, vol. 18, n. ° 1, pp. 4-6, 2010. <https://doi.org/10.3109/10398560903180125>
- [11] M. Venus y M. g. Holtforth, "Interactions of International Pilots' Stress, Fatigue, Symptoms of Depression, Anxiety, Common Mental Disorders and Wellbeing", *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, vol. 9, n. ° 1, pp. 1-26, 2022. <https://doi.org/10.15394/ijaaa.2022.1667>
- [12] J. Cahill, P. Cullen, S. Anwer, S. Wilson y K. Gaynor, "Pilot Work Related Stress (WRS), Effects on Wellbeing and Mental Health, and Coping Methods", *The International Journal of Aerospace Psychology*, vol. 31, n. ° 2, pp. 87-109, 2021. <https://doi.org/10.1080/24721840.2020.1858714>
- [13] M. Subirats Ferrer, "El estrés en el alumno de vuelo", Tesis de Maestría, Universitat Oberta de Catalunya, Barcelona,

- [14] 2020. <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/122527/6/msubiratsTFM0220memoria.pdf>
- [15] M. Sehlström, "Personality and Stress in Simulated Aviation Training", Student thesis, Umeå universitet, Institutionen för psykologi, 2018. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:umu:diva-149068>
- [16] M. R. Vauro Desiderio y J. Labarthe Carrara, "Estresores laborales y bienestar en el trabajo en personal aeronáutico de cabina", *Ciencias Psicológicas*, Vol. 9, no. 2, pp. 293–308, 2015. <https://doi.org/10.22235/cp.v9i2.616>
- [17] T. Laukkala *et al.*, "Pilot Posttraumatic Stress Disorder and Fatal Aviation Accidents", *Aviation Psychology and Applied Human Factors*, vol. 8, n. ° 2, pp. 93–99, 2018. <https://doi.org/10.1027/2192-0923/a000144>
- [18] E. Ozel y U. Hacioglu, "Examining the relationship between burnout and job satisfaction of flight crew", *International Journal of Business Ecosystem & Strategy*, vol. 3, n. ° 1, pp. 01–20, 2021. <https://doi.org/10.36096/ijbes.v3i1.246>
- [19] C. Jiménez, K. Kasper, J. Rivera, A. B. Talone y F. Jentsch, "Crew Resource Management (CRM)", *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 59, n. ° 1, pp. 946–950, 2015. <https://doi.org/10.1177/1541931215591274>
- [20] M. Bazargan y V. S. Guzhva, "Factors contributing to fatalities in General Aviation accidents", *World Review of Intermodal Transportation Research*, vol. 1, n. ° 2, p. 170, 2007. <https://doi.org/10.1504/writr.2007.013949>
- [21] C. R. Arellano Gallego y L. Santos, "La influencia del factor humano en los accidentes aéreos ocurridos en la aviación del ejército", Tesis de Maestría, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador, 2019. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/20460>
- [22] Y. Díaz Bustamante y L. J. Rincón Marín, "Identificación de los factores que pueden ser generadores de estrés al interior de la escuela de aviación halcones y que inciden directamente en el desempeño laboral de los empleados durante el segundo semestre del 2010 y el primer semestre 2011", Trabajo de Grado, Institución Universitaria de Envigado, Envigado, Colombia, 2011. <http://bibliotecadigital.iue.edu.co/jspui/handle/20.500.12717/545>
- [23] A. Ospina Stepanian, "Síntomas, niveles de estrés y estrategias de afrontamiento en una muestra de estudiantes masculinos y femeninos de una institución de educación superior militar: análisis comparativo", Tesis de Maestría, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2016. <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/88555>
- [24] F. O. Lachica, *Vivir sin estrés*. Col. Santa Cruz Atoyac, México: Editorial Pax México, 2007.
- [25] B. L. Weiss, *Eliminar el estrés*. Barcelona (España): Ediciones B, 2014.
- [26] J. Melgosa, *¡Sin Estrés! Nuevo Estilo De Vida*. Editorial Safeliz SL, 2006.
- [27] C. M. Aguirre, "Estresores laborales y calidad de vida en pilotos hispanoparlantes de aeronaves comerciales", Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca, Salamanca, 2014. <https://doi.org/10.14201/gredos.127292>
- [28] F. Conforti, CRM y *Factores Humanos: Análisis de accidentes reales*. Buenos Aires: Edición Argentina, 2018.
- [29] D. Muñoz-Marrón, "Factores humanos en aviación: CRM (Crew Resource Management - Gestión de Recursos de la Tripulación)", *Papeles del Psicólogo*, vol. 39, n.° 3, 2018. <https://doi.org/10.23923/pap.psicol2018.2870>
- [30] Y. M. Calderón Pozo, "Síndrome de burnout y satisfacción laboral en pilotos de la Línea Aérea Amazonas", Trabajo de grado, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, 2020. <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/25180>
- [31] M. Alonso, "La psicología aeronáutica y su contribución a la seguridad aeroespacial", *Revista Argentina de Psicología*, vol. 52, n.° 1, pp. 12–29, 2013.
- [32] Federal Aviation Administration. "Human Factors in Aviation Safety (AVS)". Federal Aviation Administration. https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/design_approvals/human_factors/
- [33] M. Martinussen y D. Hunter, "Aviation Safety", en *Aviation Psychology and Human Factors*. Second edition. | Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, [2017]: CRC Press, 2017, pp. 313–336. <https://doi.org/10.1201/9781315152974-11>
- [34] R. Mon Lecina, "Psicología y factores humanos en la aviación", Trabajo de grado, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, 2016. <https://core.ac.uk/download/pdf/78547172.pdf>
- [35] F. Cornejo Barrientos, "CRM en aviación y la importancia del liderazgo", *Revista de Marina*, vol. 138, n.° 984, pp. 56–63, 2020.
- [36] H. Acuña, "El entrenamiento CRM (Crew Resource Management) aplicado al ámbito de la Fuerza de Submarinos de la Armada Argentina (Operaciones de Submarinos y de Buzos Tácticos)", Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, 2013. <http://nulan.mdp.edu.ar/1928/>

Degradación térmica de ácido ascórbico en jugo de limón

Thermal degradation of ascorbic acid in lemon juice

María Antonieta Riera ^{1*} , Ynet Gómez-Salcedo ¹ , Rosa Córdova-Mosquera ¹ 

¹ Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Departamento de Procesos Químicos, Alimentos y Biotecnología, Ecuador

maria.riera@utm.edu.ec; ynet.gomez@utm.edu.ec; rosa.cordova@utm.edu.ec

Fecha de recepción: 15 de marzo de 2022; Fecha de aprobación: 30 de junio de 2022.

*Autor de correspondencia: María Antonieta Riera (maria.riera@utm.edu.ec)

RESUMEN. El limón (*Citrus aurantifolia*), se destaca como una de las fuentes abundantes de ácido ascórbico (vitamina C). La disponibilidad de dicha vitamina puede ser reducida significativamente durante el procesamiento industrial del limón por acción de la temperatura, entre otras variables de interés. El objetivo de este trabajo es evaluar la degradación térmica del ácido ascórbico en el jugo de limón para las relaciones temperatura-tiempo 65°C, 75°C, 85°C y 95°C a los 5, 10, 15 y 20 min, usando el método de titulación yodométrica. El jugo tanto fresco como tratado térmicamente, se caracterizó en términos de pH y grados Brix. Se determinó que la concentración de ácido ascórbico en el jugo de *Citrus aurantifolia* se redujo cerca del 40% respecto a su concentración inicial, al exponerlo a 75°C durante 20 min. Se constató que, en todos los casos evaluados, la degradación de la vitamina C sigue una cinética de orden. Los resultados de esta investigación pueden conducir a mejorar la estabilidad del ácido ascórbico en los derivados del limón. De acuerdo con los resultados obtenidos en cuanto a concentración de ácido ascórbico, °Brix y pH, se sugiere el uso de temperaturas de operación entre 65°C y 75°C con tiempos de cocción entre 15 y 20 min, de modo que se obtengan productos procesados derivados del limón donde se conserven las características de la fruta fresca y se potencie su comercialización.

Palabras clave. Ácido ascórbico, cinética, degradación, limón, tratamiento térmico.

ABSTRACT. Lemon (*Citrus aurantifolia*) is one of the abundant sources of ascorbic acid (vitamin C). The availability of this vitamin can be significantly reduced, during the industrial processing of lemon juice to the action of temperature, among other variables of interest. The objective of this work was to evaluate the thermal degradation of ascorbic acid in lemon juice for the temperature-time relationships 65°C, 75°C, 85°C and 95°C at 5, 10, 15 and 20 min, using the method of iodometric titration. Both fresh and heat-treated juice were characterized in terms of pH and Brix degrees. The concentration of ascorbic acid in *Citrus aurantifolia* juice, was reduced by about 40% compared to its initial concentration, when exposed to 75°C for 20 min. The degradation of vitamin C follows an order kinetics in all the cases evaluated. The results of this research can be to improve the stability of ascorbic acid in lemon derivatives. According to the results obtained in ascorbic acid concentration, °Brix, and pH, the operating temperatures has been between 65°C and 75°C, with cooking times between 15 and 20 min. It is expected to obtain products derived from lemon where the characteristics of the fresh fruit are preserved, and its commercialization is enhanced.

Keywords. Ascorbic acid, kinetics, degradation, lemon, heat treatment.

1. Introducción

El limón sutil (*Citrus aurantifolia*), es un fruto color verde de forma globosa, amarillento al madurar y cáscara delgada. Se caracteriza por tener semillas, una pulpa verde y jugosa con sabor ácido y aromático [1]. Es originario del sur de Asia y fue introducido a América por los españoles y portugueses en el siglo XVI. Se trata de una variedad muy común en Centroamérica y el Caribe, con buena adaptación en los climas tropicales y subtropicales [2].

En el Ecuador debido a su ubicación geográfica se favorece el cultivo de lima y limones. Este tipo de especie seguido del limón Tahití (*Citrus latifolia* Tan) son las más numerosas, con una extensión cercana a las 4,400 hectáreas de cultivo [3]. El destino de esta producción es el de fruta fresca tanto para el consumo interno como para exportación, dado que no existe la industria que permita la creación de un nuevo producto derivado del limón con valor agregado [4].

Según Bernal *et al.* [5], tras el auge que ha cobrado el interés por los denominados alimentos funcionales, frutas como el limón han sido revalorizadas por constituir matrices alimenticias con contenido de micronutrientes, antioxidantes y fibra con un potencial para el desarrollo de este tipo de alimentos. Sin embargo, en la actualidad los procesos más utilizados para la conservación y comercialización de frutas son la congelación, deshidratación, métodos químicos por adición de sustancias conservantes, enlatados, jugos, néctares, mermeladas y jaleas [6].

Uno de los métodos tradicionales usados en la producción de jugos es el térmico, el cual consiste en utilizar altas temperaturas para contrarrestar pérdidas del producto por contaminación microbiológica y al mismo tiempo prolongar la vida útil [7].

El uso de esta tecnología de procesamiento puede afectar la calidad nutricional y sensorial del jugo. Por una parte, el tratamiento térmico modifica los planos de fractura de las células vegetales, causando modificaciones en el color, sabor y textura. Así mismo causa degradación de sus componentes activos, siendo los menos estables el ácido ascórbico, el ácido pantoténico, la vitamina B6 y la B12 [8].

El ácido ascórbico, ascorbato o mejor conocido como vitamina C ($C_6H_8O_6$), es una molécula simple, cristalina, hidrosoluble, de color blanco, con estructura similar a la de la glucosa. Juega un papel protector del cerebro y del sistema nervioso sobre los efectos causados por el estrés. Interviene en la producción de colágeno necesario para los huesos, ligamentos y tendones. Su ausencia puede causar escorbuto y con ello afecciones en encías y dientes [9].

La vitamina C se puede encontrar en algunas frutas o verduras como la mandarina, naranja, pomelo, grosella negra, kiwi, caqui, guayaba, limón, fresa, pimiento rojo, perejil, espinaca, coliflor, lechuga, tomate, entre otras [10]. En jugos de fruta fresca la cantidad de ácido ascórbico permanece inalterable durante las primeras siete horas de su preparación [11].

Ante la presencia de mecanismos de degradación, esta vitamina presenta variaciones de su contenido. Entre ellos se mencionan la temperatura, la concentración de sal y azúcar, el pH, el oxígeno, las enzimas, los catalizadores metálicos, la concentración inicial de ácido y la relación entre ácido ascórbico y su forma oxidada - ácido dehidroascórbico [12].

Estudios realizados demuestran que el tratamiento térmico aplicado a jugos de frutas afecta significativamente la concentración de sólidos solubles, la acidez y la concentración de vitamina C [13]. Es posible determinar la degradación del ácido ascórbico en un producto determinado haciendo un estudio cinético, lo cual permite no sólo estudiar su comportamiento sino también predecir las condiciones más favorables para su almacenamiento, el tiempo de vida media y la vida útil del producto [14].

Este trabajo tiene como objetivo evaluar la variación que presenta el contenido de ácido ascórbico en el jugo de limón al ser sometido a un proceso de tratamiento térmico. El mismo se contextualizó en el Ecuador, donde se cultivan dos variedades: el limón Sutil (*Citrus aurantifolia* (Christm) Swingle) y el limón Tahití (*Citrus latifolia* (Yu. Tanaka) Tan), tanto para el consumo local como exportación [15]. Se considera uno de los principales cultivos del país y en total para el año 2021, se registraron 5,230 hectáreas cultivadas con una producción de 22,403 toneladas [16].

En este sentido, la presente investigación permite monitorear las características físicas del producto a la vez que se obtienen los parámetros cinéticos de la operación unitaria, los cuales son requeridos en el diseño de un proceso industrial de este tipo. Su realización proporciona las condiciones de operación más favorables, dentro de los parámetros evaluados, para el tratamiento térmico del jugo de limón. Esto contribuiría con el establecimiento de variables útiles para el diseño de un proceso similar al estudiado, donde se busque además de alargar la vida útil del producto, maximizar el contenido de ácido ascórbico de la fruta procesada.

La estructura de este trabajo contempla la metodología empleada, donde se describen los materiales y métodos utilizados en la experimentación y análisis estadístico realizado. A continuación, se exponen los resultados obtenidos y se genera una discusión a partir de investigaciones afines al tema abordado. Posteriormente se presentan las conclusiones generadas en el trabajo, finalizando con los agradecimientos y referencias consultadas.

2. Materiales y Métodos

2.1. Materiales

En la experimentación se utilizó limón de producción local, el cual se adquirió en un mercado local de la costa ecuatoriana. Para la elaboración del néctar se higienizó la

fruta y se extrajo manualmente la pulpa, la cual se exprimó para obtener el zumo. Este se filtró para eliminar grumos o semillas. El néctar se preparó con 50mL de zumo de *Citrus aurantifolia* y 150mL de agua destilada de acuerdo con las especificaciones mínimas requeridas para jugos o pulpas de esta fruta [17]. Se agitó durante 15 segundos y se almacenó en un vaso de precipitados. Se determinó el pH con un potenciómetro InoLab® Multi 7110, WTW y °Brix del néctar con un refractómetro marca ATC.

2.2. Procedimiento experimental

El estudio de la cinética de degradación del ácido ascórbico del néctar se llevó a cabo a tres temperaturas de trabajo 75°C, 85°C y 95°C. El tratamiento térmico de desarrollo mediante una placa calefactora digital Thermo Scientific™ Cimarec. Para cada temperatura de trabajo, se tomaron muestras del néctar a los 5, 10, 15 y 20 min, las muestras se enfriaron rápidamente en un baño con hielo y se procedió a la determinación pH, °Brix y a la determinación, por triplicado, del contenido de ácido ascórbico [18].

La determinación de ácido ascórbico se desarrolló mediante una titulación redox con yodo 0.11N como reactivo valorante. Previamente el yodo se tituló con ácido ascórbico patrón Fisher Chemical [19].

2.3. Método integral de análisis de datos

En el método integral de análisis de datos se ensaya una ecuación cinética particular, se integra y se comparan los datos calculados y experimentales de concentración frente a tiempo. Si el ajuste no es satisfactorio se sugiere y ensaya otra ecuación cinética [20]. El procedimiento general de cálculo puede resumirse del modo siguiente:

En un sistema de volumen constante la expresión cinética para la desaparición del ácido ascórbico (reactante A) será de la forma siguiente:

$$-r_A = \frac{-dC_A}{dt} = kf(C) \quad (1)$$

Donde r_A es la velocidad de la reacción, $-dC_A/dt$ es el avance de la reacción con el tiempo, C_A es la concentración del ácido ascórbico a un tiempo t (min), C_{A0} es la concentración inicial del ácido ascórbico, y t es tiempo (min), k es la constante de la velocidad de la reacción (min^{-1}), $f(C)$ es la función de la concentración. Separando variables, se obtiene (2):

$$\frac{-dC_A}{f(C)} = kdt \quad (2)$$

En la que $f(C)$ solamente ha de contener concentraciones de sustancias que puedan expresarse en función de C_A . La integración de la ecuación (2) puede hacerse analítica o gráficamente, para dar (3):

$$-\int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{f(C)} = k \int_0^t dt = kt \quad (3)$$

Esta función de la concentración es proporcional al tiempo, por lo tanto, una representación gráfica de la misma ha de conducir a una recta de pendiente k , para la ecuación cinética que se está asumiendo. A partir de los datos experimentales se calculan los valores numéricos de la integral de la ecuación (3) y se representan frente a los correspondientes tiempos. Se observa si estos datos se distribuyen sobre una recta que pasa por el origen; en caso afirmativo podemos decir que la ecuación cinética ensayada se ajusta a los datos. Si los datos se distribuyen mejor sobre una curva, se ha de rechazar la ecuación cinética y su mecanismo, y ensayar con otra ecuación.

Las ecuaciones empleadas para determinar la cinética de la degradación térmica del ácido ascórbico en el jugo de limón corresponden a las expresiones de la ley de velocidad integrada la cual se tiene en (4):

$$C_A = C_{A0}e^{-kt} \quad (4)$$

2.4. Dependencia de la temperatura según la ecuación de Arrhenius

Para la inmensa mayoría de las reacciones se ha encontrado que el efecto de la temperatura sobre la velocidad de reacción está dado por la relación de la energía de activación y el nivel de temperatura sobre la constante cinética k . Dicha relación se describe a través de la ecuación de Arrhenius (5):

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (5)$$

Donde A es el factor preexponencial, E_a es la energía de activación ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), R es la constante universal de los gases ideales ($8.31 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), T es la temperatura absoluta (K). Esta expresión se considera como una primera aproximación adecuada para el estudio del efecto de la temperatura sobre la ecuación cinética.

Las reacciones con energía de activación grande son muy sensibles a la temperatura, mientras que ocurre lo

contrario para las reacciones con energías de activación pequeñas. La determinación de la energía de activación se desarrolló a partir de la ecuación de Arrhenius linealizada (6), evaluada para dos temperaturas de trabajo, de la forma:

$$\ln \frac{k_1}{k_2} = \frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (6)$$

2.5. Procesamiento estadístico de los datos

Para la interpretación de datos se utilizó el análisis de varianza empleando el Software Statgraphics.

3. Resultados y discusión

Los valores de pH de las muestras son en todos los casos inferiores a 4.5 (figura 1), en concordancia con lo que establece el Instituto Ecuatoriano de Normalización [17]. En una investigación realizada en el Perú, para el zumo de limón tahití (*Citrus latifolia*) y limón rugoso (*Citrus jambhiri Lush*) se registró un pH de 2.39 y 2.13 respectivamente, medido a temperatura ambiente [21]. Así mismo, en un trabajo desarrollado con jugo de limón producido en Argentina, se determinó un pH de 2.19 [22]. En un trabajo similar se obtuvo un pH de 2.73 en jugo de limón sin pasteurizar, almacenado a 27°C [22].

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, se evidencia que el pH del néctar no sufre incrementos significativos con el aumento de la temperatura. Sin embargo, esto no concuerda con lo reportado por Avalo *et al.* [23], quienes afirman que producto de la degradación del ácido ascórbico, aumenta la concentración de ácido deshidroáscorbico y con ello el pH. Esto indica que en las condiciones en las que se desarrolló el tratamiento térmico del néctar no se aprecia gran degradación del ácido ascórbico.

El incremento del pH a través del tiempo puede deberse a la fermentación de los azúcares presentes, siendo capaces de degradar los ácidos orgánicos y formar la producción de acetaldehído [21].

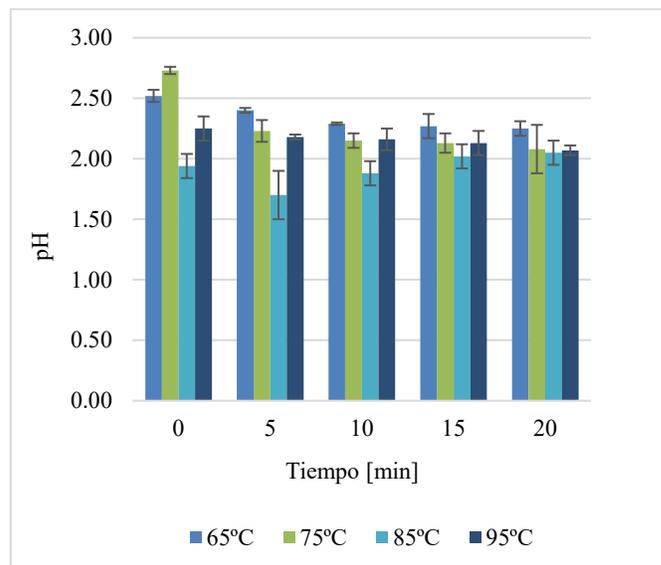


Figura 1. pH de las muestras

En la figura 2 se exponen los resultados de la determinación de los sólidos solubles (°Brix) de las muestras sometidas a las diferentes condiciones de temperatura, durante el transcurso del tiempo. En el zumo fresco de limón tahití (*Citrus latifolia*) y limón rugoso (*Citrus jambhiri Lush*) almacenado a 5°C, se registraron °Brix de 6.20% y 6.00% respectivamente. El contenido de los sólidos solubles en frutas cítricas varía en dependencia de la madurez del fruto y con el tiempo de almacenamiento [21].

El contenido de sólidos solubles en esta investigación no sufrió variaciones significativas tal como sucede en el caso del jugo fresco de maracuyá con relación al pasteurizado [24]. Los procesos térmicos en combinación con otros tratamientos, como los enzimáticos y las tecnologías de membranas, se emplean en la concentración de jugos de frutas para aumentar el contenido de °Brix, mantener o incorporar los componentes aromáticos del producto fresco, de modo que se mejoren los atributos sensoriales del producto final [25].

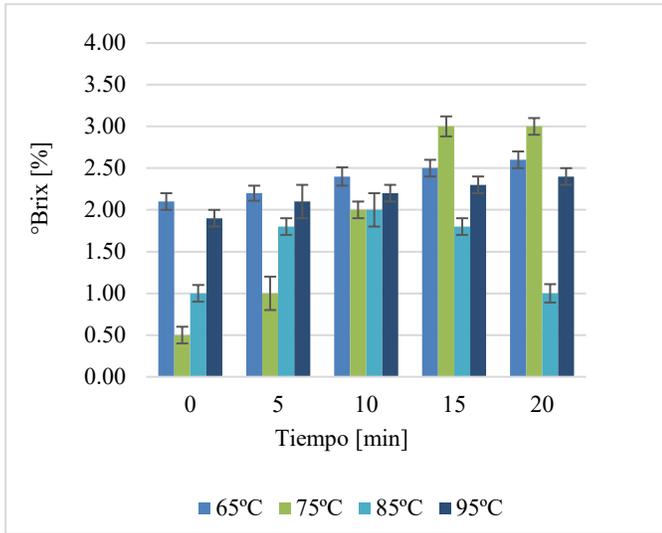


Figura 2. Grados Brix de las muestras.

3.1. Procesamiento estadístico de los datos

En la tabla 1 se muestra la variación de la concentración de ácido ascórbico en el néctar de limón, a las temperaturas evaluadas en el estudio.

Tabla 1. Variación de la concentración de ácido ascórbico (AA) (mg. mL⁻¹) en el tiempo

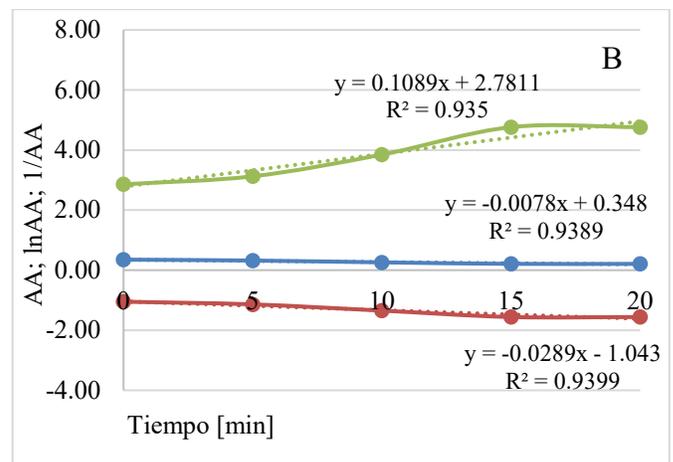
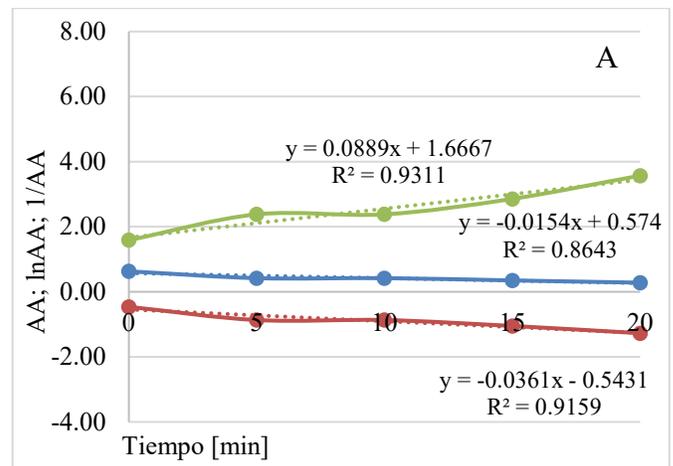
Tiempo (min)	65°C	75°C	85°C	95°C
0	0.63±0.02	0.35±0.01	0.27±0.06	0.23±0.03
5	0.42±0.02	0.32±0.01	0.23±0.02	0.21±0.01
10	0.42±0.09	0.26±0.02	0.21±0.02	0.17±0.02
15	0.35±0.03	0.21±0.05	0.17±0.04	0.16±0.02
20	0.28±0.04	0.21±0.02	0.15±0.06	0.14±0.04

La degradación del ácido ascórbico presentó un comportamiento exponencial a través del tiempo. Efectos similares se observan en el tratamiento térmico de néctar de mango [26] y fresa [27], en los cuales el porcentaje de vitamina C disminuyó al aumentar tanto la temperatura de proceso como el tiempo de exposición al tratamiento. Según Santander *et al.* [28], la disminución del ácido ascórbico se podría atribuir a su termolabilidad, siendo susceptible a la oxidación química y enzimática, y su velocidad de deterioro depende del método de procesamiento empleado y las condiciones de almacenamiento. Sin embargo, se evidenció que no existen diferencias significativas en cuanto al porcentaje de reducción de la concentración de ácido ascórbico en las muestras ya que en todos los casos este fue de

alrededor del 40%, si se tienen en cuenta los valores iniciales y finales de concentración.

En una investigación donde se evaluó la estabilidad de la vida útil del jugo de limón envasado sin pasteurizar, se evaluó el contenido de ácido ascórbico inicialmente reportando un valor de 0.39mg.mL⁻¹ y posterior a tres semanas de almacenamiento a una temperatura promedio de 27°C, se redujo hasta 0.22mg.mL⁻¹, siendo una reducción cercana al 40 % [22], tal como sucedió en este estudio. Otra investigación en la cual se evaluó el efecto de la temperatura sobre el contenido de ácido ascórbico en jugo de limón fresco, se obtuvieron disminuciones del 33.33% al 40% sobre el contenido inicial de vitamina C, al cabo de 100 minutos de tratamiento térmico [30].

Con los resultados obtenidos en la degradación térmica del ácido ascórbico del jugo de limón, se realizó el estudio cinético tal como se expone en la figura 3.



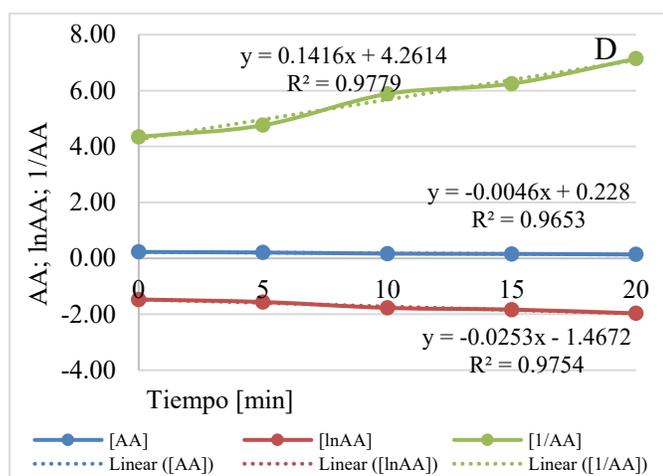
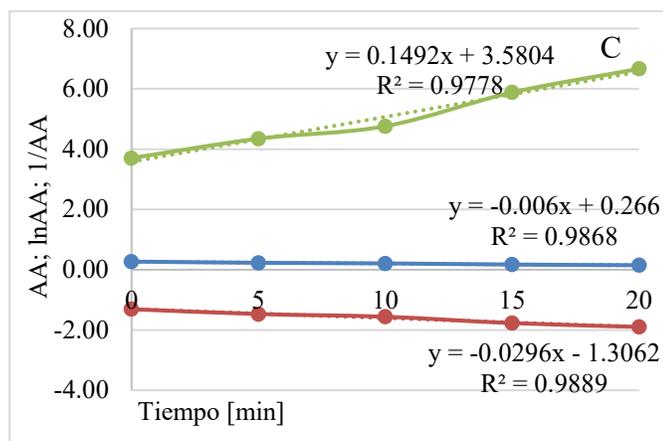


Figura 3. Cinética de la degradación térmica del ácido ascórbico en el néctar de limón. A: 65 °C; B: 75 °C; C: 85 °C; D: 95 °C. [AA]: Orden cero, [lnAA]: Primer orden; [1/AA]: Segundo orden

Se determinó que la reacción responde a una cinética de primer orden. Resultados similares lo reportan estudios hechos para el jugo de maracuyá [24] y el zumo de naranja [29]. La incidencia del tratamiento térmico sobre degradación del ácido ascórbico se evidenció en el incremento del valor de la constante cinética, al aumentar la temperatura de operación [11].

La energía de activación calculada fue de $6.7\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, la cual es similar a la que se reporta en un estudio cinético para evaluar la degradación de la actividad antioxidante de jugos cítricos por tratamiento térmico [30], quienes determinaron un valor de energía de activación para el jugo de limón de $8.4\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. Valores de E_a de este orden indican una baja sensibilidad térmica a la degradación [31]. De la misma manera por Acevedo *et al.* [30], atribuyen una menor sensibilidad a la temperatura a la

degradación del ácido ascórbico del jugo de limón con respecto a los jugos de mandarina, naranja, pomelo y lima.

4. Conclusiones

La degradación térmica del ácido ascórbico en el jugo de limón para las temperaturas entre 65°C y 95°C sigue una cinética de primer orden, por lo que los tratamientos térmicos en este intervalo de temperaturas podrían tener efectos similares en la pérdida de vitamina C para derivados del limón. La medida de sensibilidad para la degradación de dicho componente se obtuvo con la E_a , evidenciando que el jugo de limón es más estable y su contenido de ácido ascórbico es menos propenso a degradarse con respecto a aquellos cuya energía de activación es mayor. Mientras menor es la temperatura de operación, se evidencia un mayor contenido de ácido ascórbico en el jugo de limón. En contraparte, un aumento en el tiempo de operación contribuye con el incremento del % Brix en el jugo. En este sentido es conveniente, definir procesos de pasteurización que se lleven a cabo entre 65°C y 75°C con duraciones entre 15 y 20 minutos, con el fin de brindar un producto donde se conserven las propiedades del limón fresco y se potencie su comercialización como producto procesado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas de la Universidad Técnica de Manabí, por permitir el acceso a su Laboratorio de Química para el desarrollo de la experimentación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores del trabajo presentado no presentan conflictos de intereses con ningún patrocinador o agencia con interés en los resultados del proyecto.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

Dos de las autoras de este trabajo participaron en la experimentación del trabajo de investigación y en la discusión de los resultados. Otra de las autoras trabajó en la preparación, revisión y escritura del manuscrito. Finalmente, todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] Sistema Integrado de Información de Comercio Exterior, “Limón Sutil”. (2016). [En línea]. Disponible en: <https://www.siicex.gob.pe/siicex/resources/fichaproducto/113pdf2014Sep22.pdf>
- [2] F. Geilfus. *El árbol al servicio del agricultor: Guía de especies*. 2da. ed. Costa Rica: Enda-Caribe, 1994.
- [3] M. Santistevan, S. Helfgott, O. Loli, y A. Julca, “Comportamiento del cultivo del limón (*Citrus aurantifolia* Swingle) en “finca tipo” en Santa Elena, Ecuador”, *Idesia Arica*, vol. 35, no. 1, pp. 45-49, 2017.
- [4] G. Roland, “Captación de nuevos mercados del limón producido en la Parroquia Ayacucho Cantón Santa Ana”, Tesis de grado, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador, 2017.
- [5] C. Bernal, C. Díaz, y C. Gutiérrez, “Probióticos y prebióticos en matrices de origen vegetal: Avances en el desarrollo de bebidas de frutas”, *Rev. Chil. Nutr.*, vol. 44, no. 4, pp. 383-392, 2017.
- [6] D. Moreno, *Guía de procesos para la elaboración de néctares, mermeladas, uvas pasas y vinos*. Bogotá: Convenio Andrés Bello, 2003.
- [7] C. Dhuique, M. Tbatou, M. Carail, C. Caris, M. Dornier, y M. Amiot, “Thermal Degradation of Antioxidant Micronutrients in Citrus Juice: Kinetics and Newly Formed Compounds”, *J. Agric. Food Chem.*, vol. 55, no. 10, pp. 4209-4216, 2007.
- [8] L. Arias, “Efectos de los tratamientos térmicos sobre las propiedades nutricionales de las frutas y las verduras”, PhD Thesis, Corporación Universitaria Lasallista, Colombia, 2016.
- [9] S. Hickey y A. Saúl, *Vitamina C: La verdadera historia*. Málaga: Editorial Sirio S.A., 2014.
- [10] J. Luna, T. Sánchez, y M. Montenegro, “Desarrollo de un modelo matemático que permita predecir el cambio del contenido de vitamina C en una matriz alimenticia sometida a tratamientos térmicos con diferentes condiciones”, *Aliment. Hoy*, vol. 24, no. 39, pp. 103-116, 2016.
- [11] Y. Villareal, D. Mejía, O. Osorio, y A. Cerón, “Efecto de pasteurización sobre características sensoriales y contenido de vitamina C en jugos de frutas”, *Biotecnol. en el Sect. Agropecu. Agroindustrial BSAA*, vol. 11, no. 2, pp. 66-75, 2013.
- [12] B. Pirone, M. Ochoa, A. Kessler, y A. Michelis, “Evolución de la concentración de ácido ascórbico durante el proceso de deshidratación de frutos de la rosa mosqueta (*Rosa glantheria* L.)”, *Rev. Investig. Agropecu.*, vol. 31, no. 1, pp. 85-98, 2002.
- [13] H. Cuastumal, B. Valencia, y L. Ordóñez, “Efectos de los tratamientos térmicos en la concentración de vitamina C y color superficial en tres frutas tropicales”, *Rev. Lasallista Investig.*, vol. 13, no. 1, pp. 85-93, 2016.
- [14] F. Mendoza, E. Hernández, y L. Ruiz, “Efecto del Escaldado sobre el Color y Cinética de Degradación Térmica de la Vitamina C de la Pulpa de Mango de Hilacha (*Mangifera indica* var *magdalena river*)”, *Inf. Tecnológica*, vol. 26, no. 3, pp. 09-16, 2015.
- [15] C. O. Valarezo Beltrón, O. G. Caicedo Camposano, D. L. Cadena Piedrahita, L. A. Alcívar Torres, A. Rodríguez Berrío, A. Julca-Otiniano. “Caracterización de fincas productoras de limón (*Citrus aurantifolia*) en Portoviejo, Ecuador”, *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, vol. 7, no. 1, pp. 88-94, 2020.
- [16] Instituto Nacional de Estadística y Censos. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Sistema de Información Pública. Cifras Agroproductivas. Principales cultivos – 2021. (2021). [En línea]. Disponible en: <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/cifras-agroproductivas>
- [17] Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), NTE INEN 2337: Jugos, pulpas, concentrados, néctares, bebidas de frutas y vegetales. Requisitos, 2008. [En línea]. Disponible en: <http://archive.org/details/ec.nte.2337.2008>
- [18] L. Ordóñez, M. Ospina, y D. Rodríguez, «Cinética de degradación térmica de vitamina C en frutos de guayaba (*Psidium guajava* L.)», *Rev. Lasallista Investig.*, vol. 10, no. 2, pp. 44-51, 2013.
- [19] A. Alvarez, S. Jorrat, y M. Genta, “Caracterización fisico-química de jugo de limón de Tucumán”, *RIA Rev. Investig. Agropecu.*, vol. 34, no. 2, pp. 49-56, 2005.
- [20] O. Levenspiel, *Ingeniería de las Reacciones Químicas*, 3ra. ed. México: Limusa Wiley, 2004.
- [21] E. Domínguez, E. Ordóñez. “Evaluación de la actividad antioxidante, vitamina C de zumos cítricos de lima dulce (*Citrus limetta*), limón tahití (*Citrus latifolia*), limón rugoso (*Citrus jambhiri* Lush) y mandarina cleopatra (*Citrus reshni*) almacenador en refrigeración”, *Investigación y Amazonia*, vol. 3, no. 1, pp. 30-35, 2013.
- [22] A. Abbasi, M. Niakousari. “Kinetics of ascorbic acid degradation in un-pasteurized Iranian lemon juice during regular storage conditions”, *Pak J Biol Sci.*, vol. 11, no. 10, pp. 1365-9, 2008.
- [23] B. Avalo, S. Pérez, y M. Tovar, “Caracterización preliminar del proceso de concentración del jugo natural de naranja en un evaporador de tres efectos”, *Interciencia*, vol. 34, no. 11, pp. 784-790, 2009.
- [24] G. Páez, J. Freay, M. Moreno, Z. Mármol, K. Araujo, y M. Rincón, “Cinética de la degradación del ácido ascórbico en jugo de parchita”, *Afinidad*, vol. 65, no. 533, pp. 51-55, 2008.
- [25] R. Ávila-de Hernández, J. Bullón-Torrealba. “La concentración de jugos de fruta: Aspectos básicos de los procesos sin y con membrana”, *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, vol. 49, no. 3, pp. 65-76, 2013.
- [26] P. Hiwilepo, C. Bosschaart, C. van Twisk, R. Verkerk, y M. Dekker, “Kinetics of thermal degradation of vitamin C in marula fruit (*Sclerocarya birrea* subsp. *caffra*) as compared to other selected tropical fruits”, *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 49, no. 2, pp. 188-191, 2012.
- [27] J. Gamboa, R. Megías, A. Soria, A. Olano, A. Montilla, y M. Villamiel, “Impact of processing conditions on the kinetic of vitamin C degradation and 2-furoylmethyl amino acid formation in dried strawberries”, *Food Chem.*, vol. 153, pp. 164-170, 2014.

- [28] M. Santander, O. Osorio, y D. Mejía, “Evaluación de propiedades antioxidantes y fisicoquímicas de una bebida mixta durante almacenamiento refrigerado”, *Rev. Cienc. Agríc.*, vol. 34, no. 1, pp. 84-97, 2017.
- [29] L. Acurio, J. Villacís, D. Salazar, L. Pérez, y A. Valencia, “Efecto de la temperatura y radiación ultravioleta de onda corta en el contenido de ácido L-ascórbico en zumo de naranja (*Citrus sinensis*)”, *Aliment. Hoy*, vol. 23, no. 36, p. 75, 2015.
- [30] B. Acevedo, M. Montiel, y J. Avanza, “Estudio cinético de la degradación de la actividad antioxidante hidrosoluble de jugos cítricos por tratamiento térmico”, *Facena*, vol. 20, no. 4, pp. 91-95, 2004.
- [31] W. Sánchez, J. Cortez, M. Solano, y J. Vidaurre, “Cinética de degradación térmica de betacianinas, betaxantinas y vitamina C en una bebida a base de jugo de remolacha (*Beta vulgaris* L.) y miel de abeja”, *Sci. Agropecu.*, vol. 6, no. 2, pp. 111-118, 2015.



Diseño de una planta solar fotovoltaica y la influencia de los datos climáticos en la producción de energía

Design of a photovoltaic solar plant and the influence of climate data on energy production

Jahir Reyna ^{1*} , Félix Henríquez ¹ , Dafni Mora ² 

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria (CINEMI), Panamá

² Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Mecánica, Panamá

jahir.reyna@utp.ac.pa; felix.henriquez@utp.ac.pa; dafni.mora@utp.ac.pa

Fecha de recepción: 4 de abril de 2022; Fecha de aprobación: 2 de junio de 2022.

***Autor de correspondencia:** Jahir Reyna (jahir.reyna@utp.ac.pa)

RESUMEN. La posibilidad de producir energía eléctrica usando tecnologías limpias en el sector energético con cero emisiones contaminantes que impactan al ambiente, convierten a la energía renovable en un atractivo para la humanidad, cumpliendo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, planes energéticos nacionales y un mejoramiento continuo del medio ambiente. En este artículo se presenta el diseño de una planta solar fotovoltaica de potencia de 5MW, en donde se verificaron los parámetros técnicos y climatológicos para el diseño de esta, así como se calculó cada parte de la planta solar fotovoltaica con las ecuaciones para el diseño de estos sistemas solares fotovoltaicos. Comprobamos los cálculos con ecuaciones de diseño simulando en el programa PVsyst, en donde comparamos los resultados de energía producida utilizando la misma base de datos climáticos en este caso PVgis y obteniendo resultados con alta similitud. Además, simulamos con dos bases de datos climáticos adicionales (Meteonorm y NASA) a la utilizada en el diseño, para verificar cuanto varía la producción de energía utilizando otros recursos climáticos, identificando que, si existe influencia de usar diferentes bases de datos climáticos en diseños de plantas solares fotovoltaicas; y que la actualización de las bases de datos climáticos a través de los años es importante, para obtener resultados con mayor precisión. Con este artículo brindamos una nueva propuesta de diseños tecnológicos renovables y referencias para el diseño de plantas solares fotovoltaicas en Panamá, así como los parámetros que influyen en su producción de energía.

Palabras clave. *Datos climáticos, diseño, energía renovable, planta solar, PVsyst, simulación.*

ABSTRACT. The possibility of producing electricity using clean technologies in the energy sector with zero polluting emissions that impact the environment, makes renewable energy attractive to humanity, fulfilling the objectives of sustainable development, national energy plans, and continuous improvement of the environment. This article presents the design of a 5MW photovoltaic solar power plant, where the technical and climatological parameters for its design were verified, and each part of the photovoltaic solar plant was calculated with the equations for the design of these photovoltaic solar systems. We check the calculations with design equations simulating in the PVsyst program, where we compare the energy produced using the same climatic database in this case PVgis and obtain results with high similarity. In addition, we simulated with two additional climatic databases (Meteonorm and NASA) to the one used in the design, to verify how much energy production varies using other climatic resources, identifying if there is an influence of using different climatic databases in designs of photovoltaic solar plants and that the updating of climatic databases over the years is important, in order to obtain results with greater precision. With this article, we provide a new proposal for renewable technological designs, and references for the design of photovoltaic solar plants in Panama, and the parameters that influence their energy production

Keywords. *Climatic data, design, renewable energy, solar plant, PVsyst, simulation.*

1. Introducción

Las ciudades de América Latina y el Caribe por el aumento de la población, la mejora de las condiciones de vida de sus ciudadanos, el crecimiento de las industrias y actividades económicas, registran una mayor demanda de energía. Esto nos quiere decir que dichas ciudades tendrán que aumentar su generación eléctrica en un 70% para el 2030 [1]. En Latinoamérica existe una gran cantidad de recursos naturales, que le da una ventaja para la generación de energía eléctrica por medio de energías renovables y la convierte en una de las áreas con más generaciones de energía limpia del mundo, como es el caso de la hidroelectricidad, ya que la República de Panamá produce más del 20% de la energía eléctrica utilizando esta tecnología [1].

El gas natural y las energías renovables cada día son más utilizadas y se vuelven más importantes en la transición energética, en ese contexto la matriz energética de las ciudades estará dominada por las energías renovables, aunque las hidroeléctricas aún son la base de nuestra matriz energética, la solar fotovoltaica, la eólica, el almacenamiento, producción y uso de hidrógeno como nueva fuente de combustible, implican grandes retos en el mercado energético Nacional.

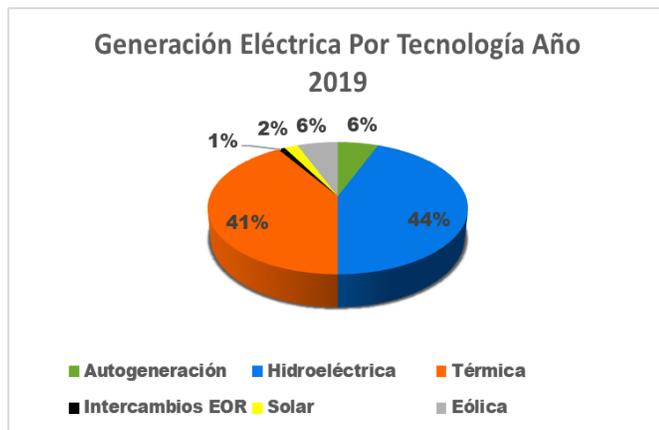


Figura 1. Fuentes de energía primaria en América Latina [1].

En la figura 1 se muestra la distribución de las fuentes de energías en Latinoamérica en los últimos años, en donde se refleja un aumento del uso de las fuentes de energías renovables. En la ciudad de Panamá la generación solar representa un aporte aun pequeño, una mayor introducción de los paneles solares, como se les

conoce, continuará en la medida que sus precios alcancen un nivel suficientemente bajo como para competir con el suministro convencional de electricidad [2].

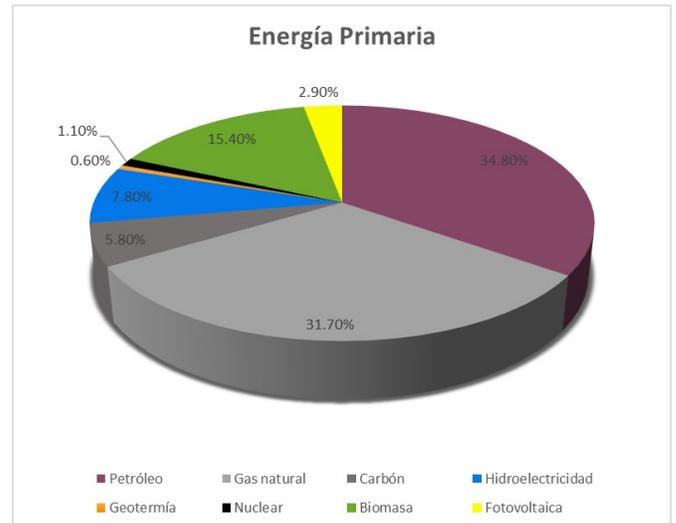


Figura 2. Generación eléctrica en Panamá por tecnología para el año 2019 [6].

En la figura 2 podemos observar que la generación de energía eléctrica con tecnología solar es muy baja en comparación con la hidroeléctricas. El compromiso actual de la República de Panamá en tal sentido es que el 30% de la capacidad instalada de la matriz eléctrica al 2050 deberá provenir de otras fuentes de energías renovables como eólica, solar y biomasa, sin contar la hidroeléctrica [3]. Estos compromisos se adaptaron debido a que, en el 2015 en la COP21 de París, los estados partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio climático (CMNUCC) adoptaron el Acuerdo de París, que establece un marco global para evitar los peligros del cambio climático limitando el calentamiento global a muy por debajo de 2°C y realizando un esfuerzos para limitarlo a 1.5°C [4-5]; La República de Panamá ratifica el Acuerdo de París mediante la Ley N°40 del 12 de septiembre de 2016 y presenta ante la Secretaría de la CMNUCC su primera contribución determinada Nacionalmente (CDN1) en abril 2016 [6].

El mayor proyecto de diseño de plantas de energía solar fotovoltaica en Panamá corresponde a la planta Penonomé, de 150MW, que está construyendo la empresa española Avanzalia [7]. Lo que nos dice que los diseños y proyectos se realizan por técnicos extranjeros

y se implementan en Panamá. Estos diseños de plantas solares fotovoltaica conectadas a la red se han diseñado en diferentes países [8], y también existen diseños solares fotovoltaicos de autoconsumo [9]. En este artículo se diseñará una planta solar fotovoltaica [10] y se utilizará el simulador PVSyst para confirmar aceptación de resultados de energía producida [11], además la variabilidad de energía producida en base al uso de diferentes bases de datos climáticos como NASA, Meteonorm y PVgis. Con el diseño de la planta solar fotovoltaica adaptada a condiciones climáticas en Panamá, se puede brindar un aporte científico a técnicos energéticos y así tener una referencia de cuáles son los parámetros de diseño, equipos, datos climáticos e información que se deben tener en cuenta para la realización de estos proyectos. A la vez poder utilizar el diseño para tener una referencia y comparación con otros diseños de plantas solares [12]; en este artículo también podrán observar cómo cambian los resultados de energía producida dependiendo de la data climática que se utilice [13].

Debido al estado de la matriz energética actual, la propuesta nos ayuda a cumplir la meta establecida en el Plan Energético Nacional (PEN) 2015-2050 de generar 4,051.13 GWh con energía solar para el año 2050 en Panamá [40], la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la aceleración de la transición energética, Acuerdo de París.

En la figura 3 se muestra el aumento de las emisiones de GEI en la ciudad de Panamá en el periodo de 1990 a 2017, en donde nuestro diseño de planta solar FV aportara a la disminución de los valores de GEI.

A medida que ha pasado el tiempo se han utilizado herramientas y softwares para facilitar los diseños, realizar análisis de tecnologías fotovoltaicas y evaluación de funcionamiento de los sistemas solares fotovoltaicos conectados a la red [14]. En donde también se han utilizado diferentes herramientas como es el caso del software PVSyst para simular centrales fotovoltaicas y comparar sus resultados [15]. Con estas herramientas podemos evaluar los desempeños que se pueden obtener con posibles propuestas de proyectos y también el rendimiento que deben presentar estos sistemas [16]. Al utilizar estos sistemas computacionales [44-45] podemos obtener mayores precisiones que al utilizar ecuaciones, y podemos analizar los diferentes parámetros que componen los sistemas fotovoltaicos [17], así como el análisis de datos climáticos. En el software Pvsyst se pueden utilizar las diferentes bases de datos climáticas internas, también el diseñador puede exportar la data climática de otra fuente que desee [18]. Con todas estas herramientas el usuario puede realizar modelados energéticos y comparación de las producciones de energía en base a los parámetros o datos climáticos [19].

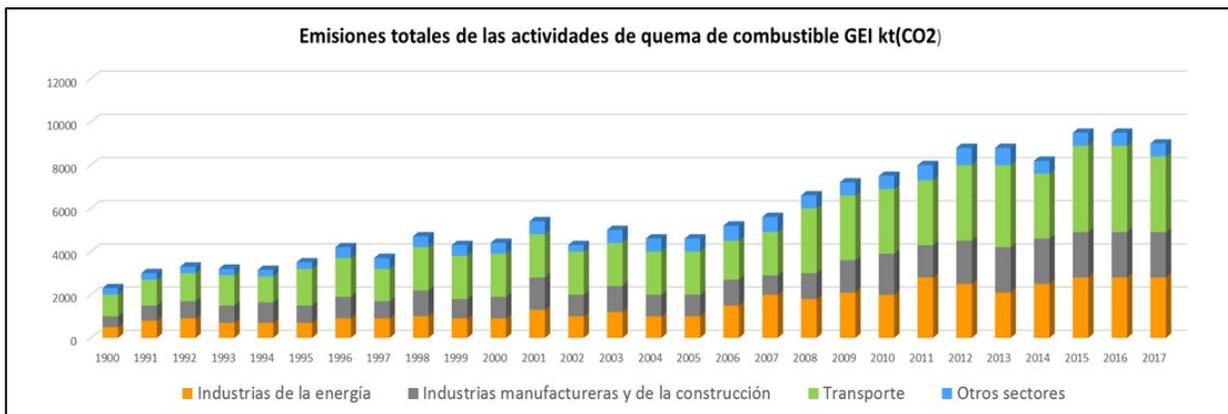


Figura 3. Emisiones totales de GEI de las actividades de quema de combustible (kt CO₂ eq) en Panamá [35].

2. Materiales y métodos

Este proyecto trata de una planta solar fotovoltaica conectada a la red eléctrica.

Los elementos básicos que componen una planta solar fotovoltaica son: 1. Módulos fotovoltaicos 2.

Inversores de DC a AC para transformación de energía eléctrica y vertido a la red 3. Estructura metálica fija para los módulos fotovoltaicos 4. Centro de transformación elevador de voltajes 5. Equipos y elementos complementarios como conductores eléctricos, cajas de conexiones, cuadros de medición de energía [20-21].

2.1. Ubicación del proyecto



Figura 4. Ubicación geográfica del proyecto [36].

El proyecto se ubica al sureste del país, en la provincia de Chiriquí, Distrito de San Félix, Corregimiento de Juay (figura 4). Para definir la ubicación de la planta de

generación fotovoltaica, se necesitó tomar en cuenta ciertos requisitos básicos para asegurar la confiabilidad y rentabilidad del proyecto como la irradiación recibida.

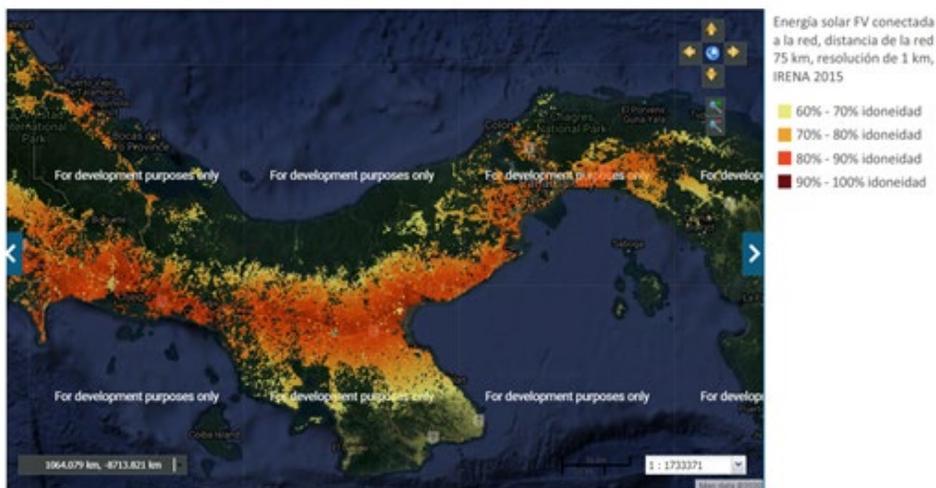


Figura 5. Lugares en la ciudad de Panamá con porcentajes adecuados de irradiancia para la construcción de proyectos solares fotovoltaicos [38].

En la ubicación específica, en base a los datos del mapa anterior, se tiene una idoneidad de 94.4% (figura 5). Estos datos se basan en estudios de irradiación por metro cuadrado, cercanía del sitio a las redes de energía eléctrica, densidad de población y densidad boscosa, entre otros [22].

2.2. Datos energéticos de la zona

Para obtener los datos energéticos de irradiación, ángulo de inclinación óptimo de los paneles y una estimación de la energía generada, utilizaremos como primera herramienta PVGIS, para obtener datos climáticos de la irradiancia mensual del lugar.

Para obtener los datos de irradiación global horizontal, ingresamos la latitud y longitud de nuestra ubicación.

Utilizamos la base de datos PVGIS-NSRDB (figura 6), con registros del año más reciente que es el 2015 [23]. Estas coordenadas la utilizaremos también para realizar la simulación en PVsyst y obtener las diferentes datos climáticas a analizar en la misma ubicación.



Figura 6. Base de datos y ubicación del proyecto, PVGIS [37].

Ejecutando el programa luego de introducir los datos del lugar, se obtienen los valores de irradiación solar

mensual en kWh/m² (figura 8), con estos datos podemos calcular las horas solares pico (H.S.P.), recordemos que las horas solares pico nos da el número de horas al día que hipotéticamente recibiremos una irradiancia de 1 kWh/m² [24].

$$HSP = \frac{\text{irradiancia total kWh/m}^2}{1\text{kW/m}^2} \times \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} \quad (1)$$

Reemplazando en la ecuación (1) los datos de irradiancia total recibida al año de 2023.10kWh/m², obtenidos de la base de datos del programa PVGIS, se calculan las horas solares pico del lugar.

$$HSP = \frac{2023.10 \text{ kWh/m}^2}{1\text{kW/m}^2} \times \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}}$$

$$HSP = 5.54$$

La planta solar fotovoltaica a diseñar es de una potencia nominal de 5000kWp, por lo que consideramos dimensionar con un 20% más para considerar las pérdidas, siendo así la potencia FV pico instalada de 6000 kWp. Es importante incrementar el resultado en al menos un 15% adicional como coeficiente de seguridad, con objeto de tener en cuenta también los picos de potencia que se producen en los arranques de algunos aparatos eléctricos [25-26]. Como dato importante de la simulación, obtenemos el ángulo de inclinación óptimo de aproximadamente 12 grados y la irradiancia mensual de lugar, estos datos nos ayudarán a realizar el arreglo de paneles, distancia entre ellos para evitar el sombreado y otros cálculos.

2.3. Paneles solares

Para la selección de los paneles solares fotovoltaicos se verificaron diferentes distribuidores y catálogos de paneles solares [27-28].



Figura 7. Paneles solares modelo CS3K [39].

En la figura 7 se muestra el panel solar escogido Modelo CS3K-320MS con una potencia unitaria pico de 320 Wp. Se muestran a continuación una vista y las características generales del panel en la tabla 1.

Tabla 1. Datos técnicos de los paneles CS3K-320MS

Potencia pico (Wp)	320W
Voltaje a potencia máxima (Vmp)	33.3V
Corriente a potencia máxima (Imp)	9.61A
Voltaje a circuito abierto (Voc)	40.1V
Corriente de cortocircuito (Isc)	10.14A
Rendimiento del modulo	19.26%
Temperatura de operación	-40°C ~ +85°C
Voltaje máximo de sistema	1500V
Tolerancia de potencia	0~ +5W
Coefficiente Voc./temp.	-0.29%/°C
Dimensiones (mm)	1675 X 992 X 35
Peso (kg)	18.5
Tipo de célula	Silicio Monocristalina

Estos datos son dados bajo condiciones estándar de prueba (STC) con una irradiancia de 1000W/m2, espectro AM 1.5 y una temperatura de células de 25°C [29].

2.4. Inversor

Para el diseño propuesto de la planta FV hemos elegido el inversor Hopewind modelo HPHV1250 con una potencia máxima de 1375 kWac. Utilizaremos 4 inversores para llegar a nuestra potencia instalada nominal de 5 MWac, se muestran la tabla 2 las características principales.

Tabla 2. Datos técnicos del inversor HPHV1250.

Características de entrada DC	
Rango de Voltaje MPPT	800 ~ 1450V
Voltaje máximo DC	1500V
Corriente máxima por entrada	1680A
Características de Salida AC	
Potencia nominal AC	1250kW
Potencia máxima AC	1375kW
Corriente nominal AC	1312A

Corriente máxima AC	1443A
Eficiencia máxima	99.0%
Voltaje de salida nominal	550V
Frecuencia	50/60Hz
Dimensiones	1600 x 2150 x 800mm

2.5. Cálculo de paneles en serie y paralelo

Para calcular el arreglo de paneles del generador debemos considerar parámetros voltaje, potencia y corriente, y se utilizó el cálculo de instalación fotovoltaica de Sunfields Europe [30].

2.5.1. Paneles en serie

Para el cálculo es importante tomar el rango de voltaje de entrada del inversor. Al conectar los paneles en serie, sumamos el voltaje de circuito abierto generado de cada panel, por lo que se tiene que verificar que este dentro del rango de voltaje del inversor. Un detalle que considerar es que el voltaje de cada panel puede variar dependiendo de la temperatura, pero debido a las condiciones climáticas en Panamá esta condición no es tan considerable como en otros países que se ven alzas y bajas de temperaturas extremas según invierno y verano, aunque de igual forma se mostraran estos cálculos.

$$V_{max} = V_{oc} + \Delta V^+ \tag{2}$$

$$V_{min} = V_{mp} + \Delta V^- \tag{3}$$

Teniendo,

V_{oc} Voltaje de circuito abierto del panel en condiciones estándar a 25°C.

V_{mp} Voltaje del panel a máxima potencia en condiciones estándar a 25°C.

ΔV^+ Aumento máximo positivo del voltaje en función del coeficiente de temperatura.

ΔV^- Aumento máximo negativo del voltaje en función del coeficiente de temperatura.

Obtengamos primero los aumentos máximos positivo y negativo con las siguientes expresiones,

$$\Delta V^+ = \Delta T \cdot \sigma \cdot V_{oc} \tag{4}$$

$$\Delta V^- = \Delta T \cdot \sigma \cdot V_{mp} \tag{5}$$

Sabiendo que " σ " es el coeficiente de temperatura. Los datos del fabricante indican un coeficiente de -0.29%/°C. También, para nuestro caso, establecemos una temperatura de módulos mínima de 10°C y una

temperatura máxima de 60°C. Reemplazamos respectivamente en las ecuaciones (4) y (5),

$$\Delta V^+ = (10 - 25) \cdot (-0.0029)(40.1) = 1.74V$$

$$\Delta V^- = (60 - 25) \cdot (-0.0029)(33.3) = -3.38V$$

Con los aumentos máximos entonces obtenemos el voltaje máximo y mínimo de los paneles con las ecuaciones (2) y (3),

$$V_{max} = 40.1 + 1.74 = 41.84 V$$

$$V_{min} = 33.3 - 3.38 = 29.92 V$$

Como mencionamos inicialmente, el rango de voltaje de entrada del inversor es el que nos dará la cantidad de paneles que podamos conectar en serie. Con este rango y los valores de voltaje máximo y mínimo de los paneles ya calculados, obtenemos la cantidad de paneles conectados en serie de la siguiente forma,

$$N_{paneles\ en\ serie\ max} = \frac{V_{max\ Inversor}}{V_{max\ panel}} \quad (6)$$

$$N_{paneles\ en\ serie\ min} = \frac{V_{min\ Inversor}}{V_{min\ panel}} \quad (7)$$

Los valores de voltaje máximo y mínimo del inversor son 800V y 1450V respectivamente. Con esto sustituimos en las ecuaciones (6) y (7),

$$N_{paneles\ en\ serie\ max} = \frac{1450}{41.84} = 34.66$$

$$N_{paneles\ en\ serie\ min} = \frac{800}{29.92} = 26.77$$

Esto nos dice que la cantidad de paneles en serie debe estar entre estos dos valores. Hemos escogido entonces un valor intermedio de 30 paneles en serie.

2.5.2. Paneles en paralelo

Ya teniendo el número de paneles en serie, calcularemos la cantidad de paneles en paralelo. Esto será la cantidad de cadenas conectadas a los inversores de 30 paneles en serie. El parámetro de importancia para este cálculo es la corriente máxima admisible de la entrada del inversor.

Para verificar entonces la cantidad máxima de paneles en paralelo que podemos conectar a **un inversor**,

tomamos la corriente máxima de entrada del inversor y lo dividimos entre la corriente de corto circuito del panel,

$$N^*_{paralelo\ max} = \frac{1680}{10.14} = 165.7$$

$$\approx 165\ paneles\ max.\ por\ inversor$$

Esta es la cantidad máxima que podemos conectar en paralelo al inversor, pero rectificaremos este valor en base a la potencia instalada que necesitamos.

Si bien nuestra planta busca tener una potencia instalada de 5MW, debemos instalar mayor cantidad de paneles en nuestro generador para compensar las pérdidas [31], dadas por la eficiencia del panel, inversor, suciedad, sombreado, etc. En consecuencia, nuestro inversor también debe soportar este sobredimensionamiento.

Determinamos instalar una cantidad de paneles para tener un 20% más de potencia en DC por lo que tendríamos 6000Wp, con este dato y la potencia Wp de cada panel, podemos determinar la cantidad total de paneles de la generadora,

$$\# Total\ de\ paneles = \frac{6000\ kWp}{320\ Wp}$$

$$\# Total\ de\ paneles = 18750$$

Ahora, ya teniendo la cantidad total de paneles y los paneles en serie, podemos calcular el total de paneles en paralelo.

$$N_{paralelo\ total} = \frac{18750}{30}$$

$$N_{paralelo\ total} = 625$$

2.6. Cantidad de inversores y ajuste de paneles en paralelo

Un solo inversor puede contener solo 165 paneles en paralelo, por lo que para llegar a nuestra potencia deseada necesitaremos varias unidades del inversor propuesto. Esto lo calculamos con los paneles totales en paralelo de la generadora entre la cantidad de paneles en paralelo que soporta una unidad de inversor,

$$N_{inversores} = \frac{N_{paralelo\ total}}{N^*_{paralelo\ max}} \quad (8)$$

Utilizando la ecuación (8) se obtienen la cantidad de inversores que requerirá la planta solar fotovoltaica según las conexiones escogidas para los paneles solares,

$$N_{inversores} = \frac{625}{165} = 3.8 \approx 4 \text{ inversores}$$

Finalmente, definido la cantidad de inversores entonces tendremos la siguiente cantidad de paneles en paralelo por cada inversor,

$$N_{paralelo} = \frac{N_{paralelo\ total}}{N_{inversores}} \quad (9)$$

Utilizando la ecuación (9) podemos establecer la cantidad final de paneles en paralelo a conectar según la cantidad de inversores, verificando que no exceda la cantidad máxima ya calculada de paneles en paralelo.

$$N_{paralelo} = \frac{625}{4} = 156.2$$

2.7. Estructura y orientación de paneles solares

Las principales consideraciones que se deben tomar para elegir la estructura sobre la que se instalarán los paneles FV son:

1. Estructuras fijas o con seguidor solar.
2. Posición vertical u horizontal del panel.
3. Espacio del terreno.
4. Económicamente viable para el proyecto.

Tomando en cuenta estas consideraciones se seleccionaron estructuras fijas debido a que tienen un menor costo y tamaño, que las de seguidor solar, además de un menor costo de mantenimiento.

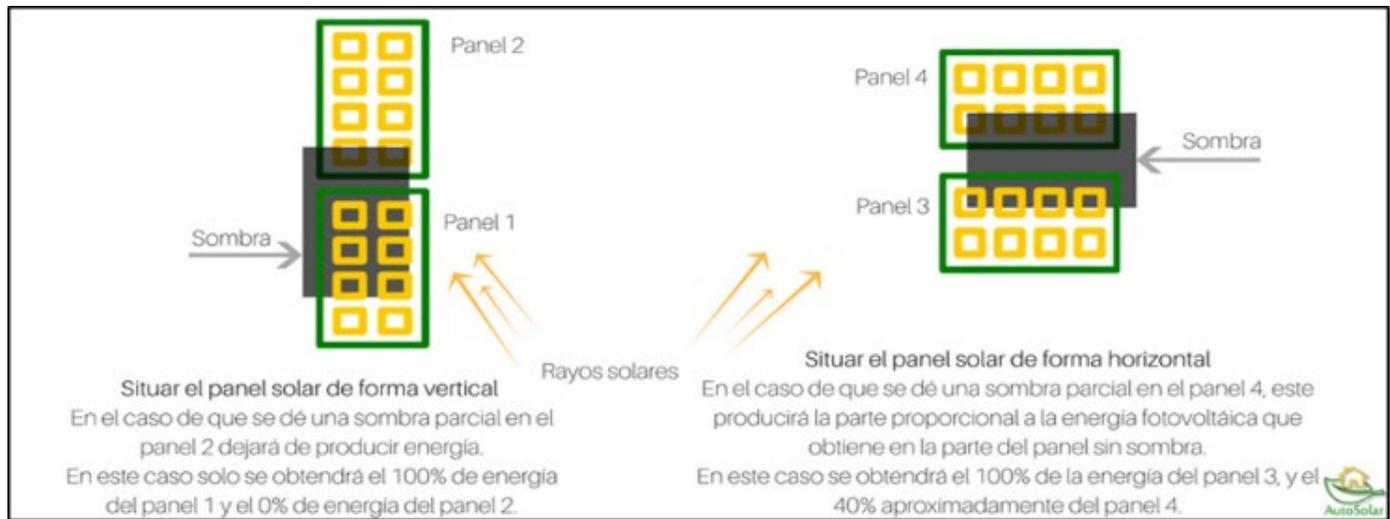


Figura 8. Sombras en paneles solares según posición vertical u horizontal [39].

Por otra parte, cuando instalamos los paneles de manera vertical, debido a la disposición de los diodos de protección o “bypass”, si un panel recibe sombra sobre las células inferiores, todas las columnas de células solares se desactivarían, haciendo que el panel, aunque este parcialmente sombreado, dejará de producir energía en su totalidad. Sin embargo, si instalamos los paneles de manera horizontal, solo dejaría de funcionar la fila de células sombreadas y el resto del panel seguiría produciendo energía [32]. En la figura 8 podemos observar este fenómeno de manera más clara.

En la figura 9 se muestran las orientaciones en las que se pueden instalar los paneles solares. Dadas las consideraciones técnicas y económicas que hemos mencionado, se decidió realizar la instalación de los paneles solares con orientación vertical.



Figura 9. Panel con orientación vertical y horizontal [39].

2.8. Distanciamiento entre filas de paneles FV

Para encontrar la distancia mínima entre filas atendiendo a la fórmula y las dimensiones dadas con la imagen representativa de nuestros paneles a continuación.

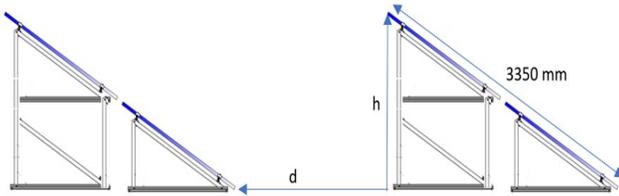


Figura 10. Imagen representativa de instalación de paneles.

La distancia “d” deberá ser como mínimo igual a “h” x “k”, siendo “k” un factor adimensional en función de la latitud del lugar y atiende a la siguiente expresión:

$$k = \frac{1}{\tan(61^\circ - \text{latitud})} \quad (10)$$

La latitud en nuestra ubicación es de 8.278° . Reemplazamos en la ecuación 10,

$$k = \frac{1}{\tan(61^\circ - 8.278^\circ)} \approx 0.761$$

Ahora para calcular h, basta con saber que el ángulo de inclinación óptimo es de 11° y con la longitud de nuestros dos paneles que es 3350 mm, le sumamos 12mm más como factor de expansión térmica y calculamos,
 $h = 3372 \cdot \sin(11^\circ) \approx 643.41 \text{ mm}$

Determinamos que la distancia mínima entre fila de paneles será, (figura 10)

$$d = h \times k$$

$$d = 643.41 \times 0.761 = 489.64 \text{ mm}$$

Con cada uno de los datos descritos en la metodología podemos calcular los resultados finales de la planta y arreglos de la planta solar en su totalidad.

2.9. Simulación en PVsyst

Pvsyst es un software diseñado para simular proyectos fotovoltaicos y cuenta con bases de datos meteorológicos como Meteonorm, PVgis y NASA [34], [41-42], además se pueden subir bases de datos de otros recursos.

Se realizó la simulación del proyecto en el software PVsyst V6.86 en su versión de prueba para comprobar y comparar los cálculos realizados [43-44]. También se utilizó el programa para analizar diferentes bases de datos climáticos que ya existen en él y verificar su influencia en los diseños de plantas solares respecto a la producción de energía. Debido que el uso de los datos climáticos influye mucho en los diseños solares, ya que la producción de energía depende de la cantidad de irradiancia recibida en el lugar.

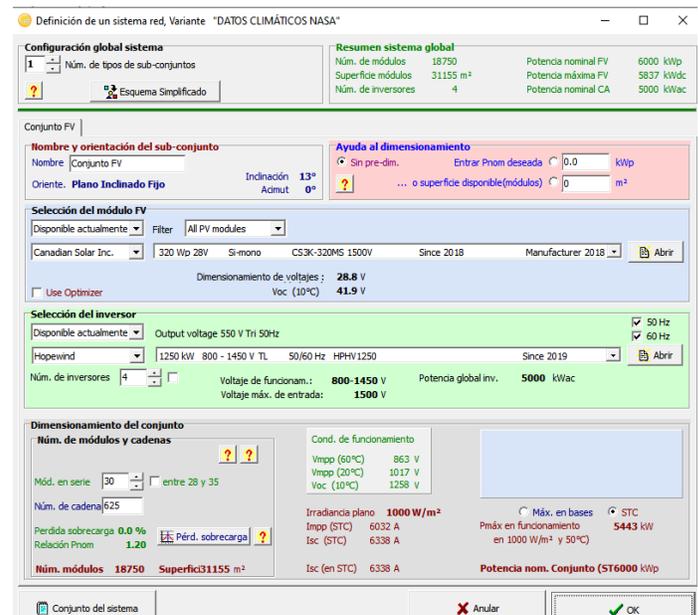


Figura 11. Ventana parámetros de diseño- sistema [11].

Para la simulación seleccionamos la casilla diseño de proyectos conectados a la red, nombramos el proyecto e introducimos las coordenadas del lugar, para luego exportar las bases de datos climáticos disponibles. Después añadimos los datos de orientación, sistema y pérdidas, donde la mayoría de información de la planta se encuentra en sistema, lugar donde definimos nuestros parámetros de diseño como cantidad de paneles, inversor (figura 11). En este programa se tienen que introducir o modificar todos los detalles técnicos adaptados a nuestro proyecto, ya que algunos vienen programados.

La herramienta de bases de datos climáticos en PVsyst es clave para nuestra investigación, debido que a través de ella podemos obtener la información meteorológica y de energía incidente de diferentes bases climáticas; así poder realizar la comparación con los datos de PVgis con la que se diseñó la planta con

ecuaciones y además verificar la similitud de energías producidas. También utilizamos otros dos datos almacenados en el mismo simulador, para ver cómo influye utilizar otros datos climáticos en la producción de energía de diseños de plantas solares como único parámetro variable dentro de PVsyst.

A continuación, presentamos las bases de datos climáticas obtenidas del software PVsyst y los resultados de la simulación en el programa, que como dato principal es la energía producida y la cantidad de irradiancia recibida según las coordenadas geográficas y clima de Panamá en la tabla 3.

Tabla 3. Datos climáticos PVgis. Fuente propia basado en [11]

DATOS CLIMÁTICOS PVGIS								
Meteorología y energía incidente								
	GlobHor KWh/m2	DiffHor KWh/m2	T_Amb °C	WindVel m/s	GlobInc KWh/m2	DiffInc KWh/m2	Alb_Inc KWh/m2	Difs_GI
Ene.	161.2	60.0	28.46	2.5	178.0	63.4	0.388	0.000
Feb.	179.0	46.6	26.73	1.4	192.0	49.0	0.431	0.000
Mar.	213.7	52.0	26.49	3.4	218.5	53.2	0.515	0.000
Abr.	169.3	74.3	26.17	1.3	164.4	73.3	0.408	0.000
May.	150.6	82.1	25.57	1.3	142.3	79.4	0.363	0.000
Jun.	143.2	77.4	24.98	1.6	133.0	74.3	0.345	0.000
Jul.	140.8	83.3	25.26	1.3	132.3	80.2	0.339	0.000
Ago.	158.4	78.6	25.17	1.1	152.0	76.8	0.381	0.000
Sep.	140.7	77.0	24.82	1.4	140.2	76.6	0.339	0.000
Oct.	125.6	76.2	24.71	1.7	129.6	77.1	0.302	0.000
Nov.	132.4	67.7	25.15	1.1	142.6	70.0	0.319	0.000
Dic.	155.6	53.7	25.21	1.0	173.9	57.0	0.375	0.000
Año	1870.6	828.9	25.47	1.6	1898.6	830.3	4.505	0.000

Al introducir los parámetros principales de diseño, ubicación y datos climáticos podemos iniciar la simulación y obtener resultados (figura 12).

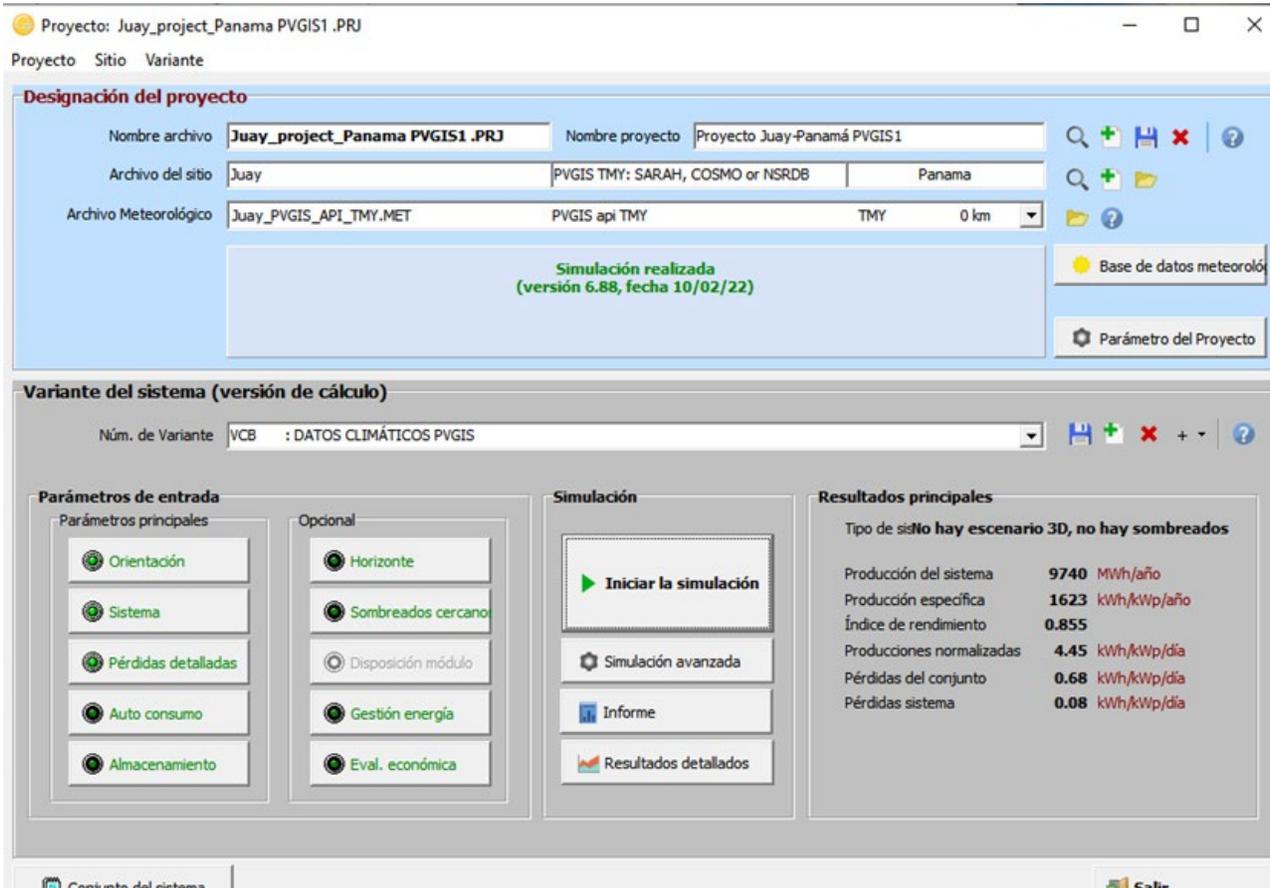


Figura 12. Simulación energía producida [11].

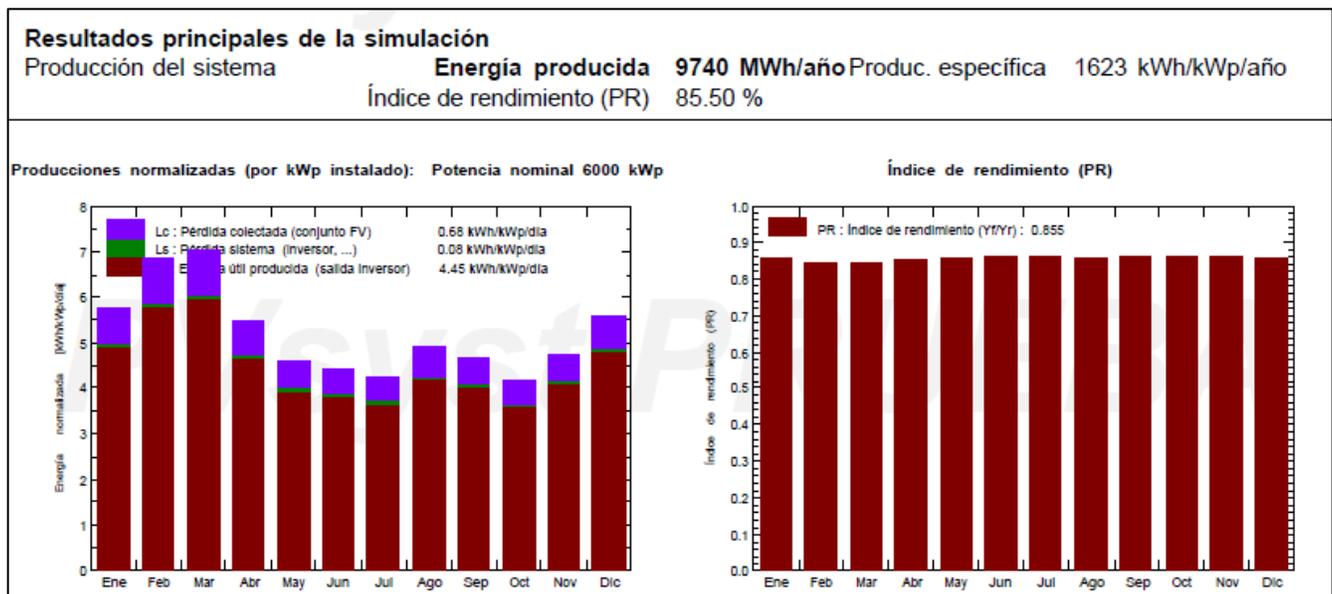


Figura 13. Informe de resultados de simulación [11].

Como resultado de la simulación se presenta la energía producida por la planta solar, energía que vamos a comparar con los resultados del diseño con las ecuaciones (figura 13). Utilizando esta metodología exportaremos las bases de datos de Meteonorm y NASA, para realizar la simulación y analizar en cuanto varía la energía producida, estos datos vienen dentro de Pvsyst. Se espera que los resultados con mayor acercamiento en cuanto a energía producida sean los de los datos PVgis, ya que se utilizó para realizar el diseño de las ecuaciones; y que las demás datos por utilizar las mismas coordenadas estén cerca de los resultados de diseño.

3. Resultados y discusión

3.1. Energía producida por el diseño de ecuaciones

Con los cálculos realizados, verificamos que esta configuración cumpla últimamente con las condiciones del inversor.

Los parámetros claves del inversor,
 Voltaje DC mínima de entrada = 800 V
 Voltaje DC máximo de entrada = 1450 V
 Corriente máxima = 1680^a
 Para 30 paneles en serie tenemos,

$$V_{inversor} = 30 * V_{oc} = 1203 V$$

Este voltaje es a condiciones estándar de prueba, con el voltaje de circuito abierto del panel. Vemos que se encuentra dentro del rango de voltaje del inversor.

También se encuentra dentro del rango de cantidad de módulos en serie máx. y min. calculado.

Para 157 paneles en paralelo (caso más crítico de la planta) tenemos,

$$I_{inversor} = 157 * I_{sc} = 1592 A$$

Esta corriente es a condiciones estándar de prueba, con la corriente de corto circuito del panel, vemos que, se encuentra por debajo de la corriente máxima del inversor [33].

Ya que cumple con los requisitos, podemos decir que la configuración calculada y escogida es apropiada. Dando una energía total producida:

$$\frac{Energía}{año} = (Pt) \times (HorasPico) \times (365 \text{ días})$$

$$\frac{Energía}{año} = (6 MW) \times (5.54) \times (365) = 12132 \text{ MWh/a}$$

Para estos diseños se tienen que tomar en cuenta mínimo 15% de pérdidas de sombra, equipos, suciedad etc., en este caso asumimos un 20%.

$$\frac{Pérdidas}{año} = (Energía/a) \times (0.2) = 2426.5 \text{ MWh/a}$$

$$E_{total \text{ producida}} = 12132 - 2426.5$$

$$E_{total \text{ producida}} = 9705.5 \text{ MWh/año}$$

3.2. Energía producida por simulación en Pvsyst

Al realizar la simulación con la base de datos climáticos PVgis, obtuvimos una energía total producida de 9740.0 MWh/ año (figura 14), lo que nos indica que el diseño con las ecuaciones es correcto. Los resultados obtenidos eran los esperados debido que, al utilizar los mismos parámetros técnicos y los mismos datos climáticos se lograría obtener una gran similitud; se observa una pequeña variación de energías, debido a que el software utiliza una mayor precisión en cuanto al cálculo de pérdidas y análisis de recurso solar de los datos climáticos [45-46].

$$\frac{E_{tdiseño}}{E_{tsimulador}} = \frac{9705.5}{9740} = 99.6\%$$

Comparación de las energías totales producidas con el diseño de ecuaciones y simulador.

3.3. Influencia de los datos climáticos en la producción de energía

Debido a la gran importancia que tiene la irradiancia y el clima en los proyectos solares fotovoltaicos, se analizaron dos datos climáticos adicionales en el simulador, para las mismas coordenadas geográficas, con la finalidad de verificar la influencia de utilizar una base de datos climáticos diferente ver tabla 4 y 5, en la producción de energía de los diseños de proyectos fotovoltaicos. Para esto se realizó el mismo proceso que en la sección metodología 2.9 y se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 4. Datos climáticos NASA. Fuente propia basado en [11].

DATOS CLIMÁTICOS NASA								
Meteorología y energía incidente								
	GlobHor KWh/m2	DiffHor KWh/m2	T_Amb °C	WindVel m/s	GlobInc KWh/m2	DifInc KWh/m2	Alb_Inc KWh/m2	Difs_Gl
Ene.	140.7	56.70	24.59	0.0	155.5	60.01	0.339	0.000
Feb.	140.0	55.70	25.04	0.0	149.0	57.98	0.338	0.000
Mar.	168.6	66.70	25.7	0.0	171.9	67.88	0.406	0.000
Abr.	150.6	69.60	25.766	0.0	146.5	68.50	0.036	0.000
May.	130.2	69.80	25.53	0.0	122.7	67.59	0.312	0.000
Jun.	121.2	65.70	25.49	0.0	112.5	63.24	0.290	0.000
Jul.	123.1	68.20	25.32	0.0	115.4	65.76	0.296	0.000
Ago.	119.0	69.80	25.31	0.0	114.5	68.13	0.286	0.000
Sep.	120.0	67.50	25.18	0.0	120.1	67.36	0.289	0.000
Oct.	116.9	64.80	24.96	0.0	121.5	66.05	0.281	0.000
Nov.	112.2	57.90	24.79	0.0	121.0	59.85	0.269	0.000
Dic.	125.9	56.10	24.72	0.0	140.5	60.04	0.303	0.000
Año	1568.4	768.50	25.2	0.0	1591.1	772.39	3.771	0.000

Observamos que al utilizar otras bases de datos climáticos nos da un menor porcentaje de producción de energía 8152MWh/año (figura 14), lo que nos dice que al utilizar diferentes datos climáticos para la misma ubicación darán resultados distintos de producción de energía y presentamos el porcentaje comparación.

$$\frac{Etdiseño}{Etsimulador} = \frac{8152}{9740} = 83.7\%$$

Esto se puede deber a que los datos climáticos se obtienen de distintas fuentes meteorológicas que no son muy precisas o se encuentran desactualizadas. Debemos tener en cuenta los efectos del cambio climático y el

aumento de la temperatura, por efectos del calentamiento global y los gases de efecto invernadero. Por esto recomendamos comparar varios datos climáticos para el diseño de plantas solares fotovoltaicas y utilizar las más confiables y actualizadas, para que el diseño vaya más adaptado a las condiciones climáticas reales. Utilizar datos climáticos muy obsoletos, puede ocasionar problemas en los diseños o toma de decisiones erróneas para el proceso de selección de equipos. Además, que puede hacer que realices una inversión mayor, debido a que mientras menos recurso solar recibas, más cantidad de paneles solares tendrás que utilizar para cubrir tu demanda de energía de diseño.

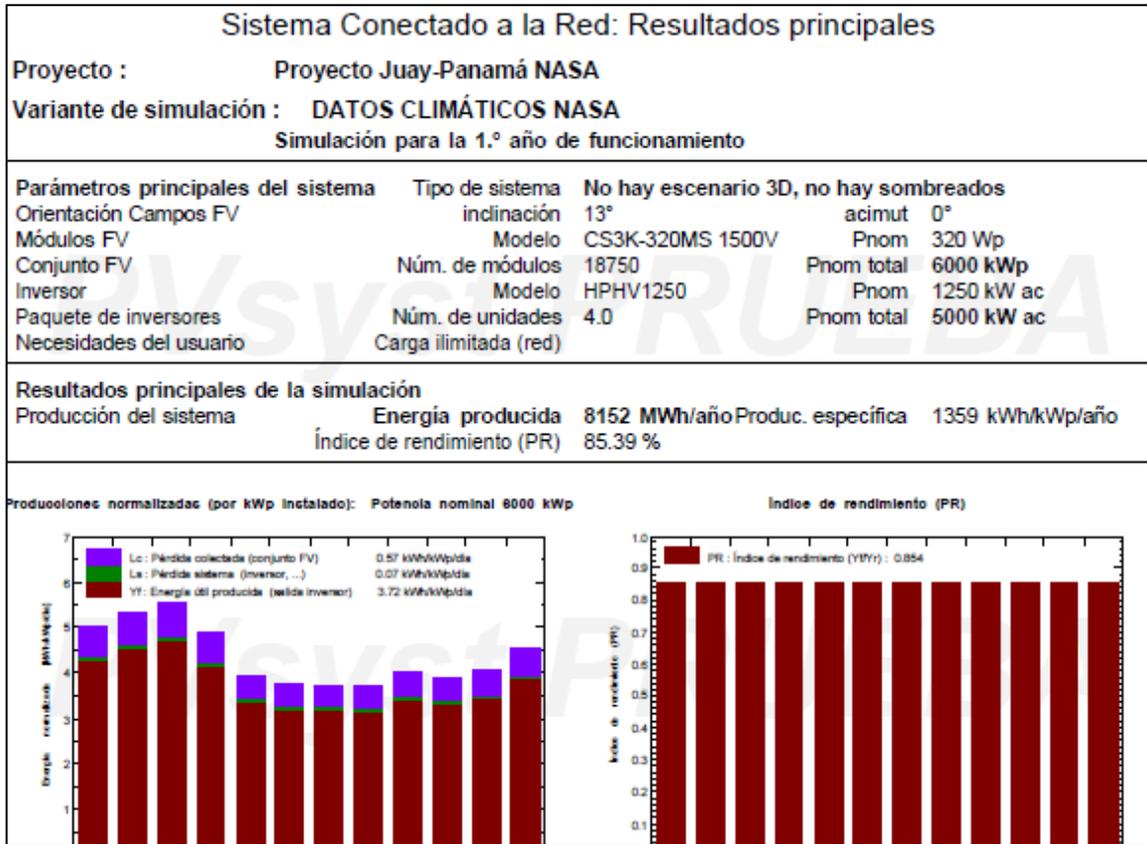


Figura 14. Informe de resultados de simulación [11].

Tabla 5. Datos climáticos MET. Fuente propia basado en [11].

DATOS CLIMÁTICOS MET								
Meteorología y energía incidente								
	GlobHor KWh/m2	DiffHor KWh/m2	T_Amb °C	WindVel m/s	GlobInc KWh/m2	DifInc KWh/m2	Alb_Inc KWh/m2	Difs_GI
Ene.	174.2	60.36	25.73	2.4	193.9	64.92	0.419	0.000
Feb.	169.2	62.32	26.34	2.5	181.3	65.55	0.407	0.000
Mar.	193.9	72.46	27.36	2.5	198.4	73.78	0.467	0.000
Abr.	173.6	75.64	27.57	2.2	168.7	74.55	0.418	0.000
May.	150.6	74.91	27.78	1.8	141.6	72.52	0.363	0.000
Jun.	141.9	72.43	27.27	1.7	131.4	69.63	0.341	0.000
Jul.	147.8	72.69	27.30	1.7	137.8	70.04	0.356	0.000
Ago.	144.1	83.04	27.28	1.7	138.1	80.94	0.347	0.000
Sep.	148.4	71.63	26.81	1.7	148.4	71.38	0.357	0.000
Oct.	137.7	78.19	26.90	1.8	142.4	79.32	0.332	0.000
Nov.	136.6	63.19	25.58	1.9	147.7	65.40	0.329	0.000
Dic.	157.1	67.47	25.93	2.0	174.8	71.53	0.378	0.000
Año	1875.2	854.26	26.82	2.0	1904.4	859.57	4.513	0.000

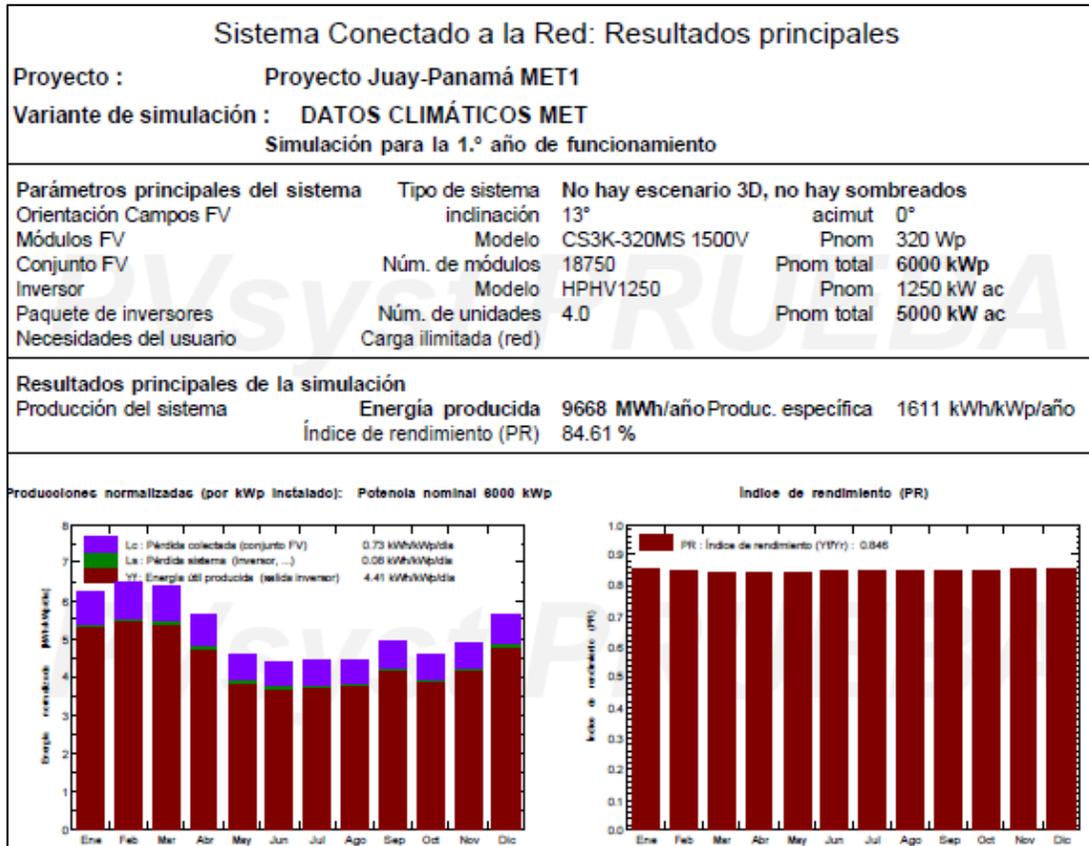


Figura 15. Informe de resultados de simulación [11].

En esta simulación podemos observar que el resultado de producción de energía de 9688MWh/año se acerca más al resultado del primer dato climático analizada (figura 15), presentamos el porcentaje comparación.

$$\frac{E_{\text{diseño}}}{E_{\text{simulador}}} = \frac{9688}{9740} = 99.4\%$$

Lo que nos brinda confianza en el diseño de la propuesta de proyecto y podemos decir que la base de datos climáticos utilizada es confiable y se encuentra actualizada por el acercamiento de los resultados.

3.4. Viabilidad económica

Luego de identificar los costos de los equipos se procede a determinar las variables económicas utilizando el programa de Excel, que permite determinar la viabilidad del proyecto, teniendo presente que TIR debe ser mayor que la tasa de rendimiento = 1%, El VAN debe ser positivo. Este estudio se realizó con el programa de

Excel donde se introducen datos del proyecto como inversión, tasa de inflación, mantenimiento, ingresos anuales y se calcular TIR y VAN

De los resultados obtenidos se Concluye:

El TIR = 12,70% > Tasa rendimiento = 1

El VAN = \$ 575,588.77, positivo > 1

Lo que se determina que el proyecto es rentable y factible técnicamente, teniendo un período de recuperación de 10 años.

4. Conclusiones

Los cálculos de diseño de la planta solar fotovoltaica son confiables y se consideran correctos, debido a su alto porcentaje similitud de resultados de energía total producida respecto a los resultados del software simulador PVsyst. Recomendamos el uso del software para realizar diseños de plantas solares fotovoltaicas y no tener que utilizar altas cantidades de ecuaciones, haciendo uso de las nuevas tecnologías y disminuyendo

los tiempos de diseños. Además, hacemos la observación de que los resultados de diseño dependen mucho de las bases de datos climáticos, ya que el diseño de planta solares se basa en la cantidad de irradiancia recibida y al utilizar bases de datos climáticos diferentes pueden variar los resultados de producción de energía, lo que nos indica que estas tienen una alta influencia en los resultados de energía total producida, en vista que depende que tan actualizadas estén y que tanto se acercan a los valores climáticos reales (datos confiables). En los resultados puede influenciar también el rango asumido de pérdidas del sistema, ya sea por sombras, mantenimiento, eficiencia de los paneles, inversor, desajuste, distancia, entre otras, que generalmente ya se encuentran preestablecidas, pero en casos especiales se deben ajustar respecto a las condiciones generales del lugar y equipos.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Universidad Tecnológica de Panamá por el apoyo de espacio físico para la elaboración de este artículo. A su vez, agradece a los integrantes del Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria de la UTP, por su apoyo en sugerencias científicas.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

F.H. apporto en este artículo referente con asesoramiento de enfoque y resultados, recomendaciones para uso ecuaciones y diseño de plantas solares fotovoltaicas, corrección del artículo.

D.M. apporto en la comparación de datos climáticos en software, la revisión bibliográfica, corrección del artículo.

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

[1] J. Paredes, “La red del futuro: Desarrollo de una red eléctrica limpia y sostenible para América Latina”, (1ra ed.), dic, 2017. [Online]. Available: [https://publications.iadb.org/es/publicacion /14076/la-red-](https://publications.iadb.org/es/publicacion /14076/la-red-del-futuro-desarrollo-de-una-red-electrica-limpia-y-sostenible-para)

del-futuro-desarrollo-de-una-red-electrica-limpia-y-sostenible-para.

[2] SNE, “Resolución de Gabinete N°93 que aprueba los lineamientos de la agenda de transición energética 2020-2030,” República de Panamá, nov. 2020. [Online]. Available: <https://www.energia.gob.pa/mdocs-posts/lineamientos-de-la-agenda-de-transicion-energetica/>.

[3] Ministerio de Ambiente, “La transición energética como motor de la recuperación económica ante la COVID-19 en Panamá,” abr. 2021. [Online]. Available: <https://recuperacionverde.com/documents/La%20Transicio%CC%81n%20Energie%CC%81tica%20com%20motor%20de%20la%20recuperacio%CC%81n%20cono%CC%81mica%20de%20la%20COVID-19%20en%20Panama%CC%81.pdf>.

[4] Wetlands International Latinoamérica y el Caribe, “Iniciativa de Creación de Capacidades para la Transparencia Climática (CBIT),” 21. May. 2021. [Online]. Available: <https://lac.wetlands.org/caso /desarrollo-del-marco-nacional-para-la-transparencia-climatica-depanama-iniciativa-de-creacion-de-capacidades-para-la-transparencia-climatica-cbit/>.

[5] Naciones Unidas, “Acuerdo de París,” nov. 2015. [Online]. Available: https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf.

[6] ASEP, “Marco legal – Electricidad,” República de Panamá, 2020. [Online]. Available: https://www.asep.gob.pa/?page_id=12471

[7] Molina, P. S., “Entra en operación en Panamá la planta Penonomé, de 150 MW. pv magazine Latin America,” feb. 2021. [Online]. Available: <https://www.pv-magazine-latam.com/2021/02/18/entra-en-operacion-en-panama-la-planta-penonome-de-150-mw/>.

[8] J. Botija Ruiz, “Diseño e instalación de una planta solar fotovoltaica de 5.5 MW conectada a la red eléctrica,” 2019.

[9] Barón Ortíz, J. L. (2015). Diseño y simulación de una instalación fotovoltaica de autoconsumo (Bachelor's thesis, Universidad Piloto de Colombia).

[10] F. Gonzalo Quesada, “Diseño e instalación de planta solar fotovoltaica conectada a red,” 2018.

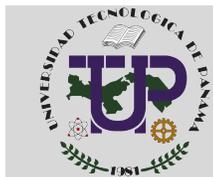
[11] R. Kumar, C.S. Rajoria, A. Sharma, & S. Suhag, “Design and simulation of standalone solar PV system using PVsyst Software: A case study. Materials Today: Proceedings,” no.46, pp. 5322-5328, 2021.

[12] P. Karki, B. Adhikary, & K. Sherpa, “Comparative study of grid-tied photovoltaic (PV) system in Kathmandu and Berlin using PVsyst,” In 2012 IEEE Third International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET), pp. 196-199, IEEE, sep. 2012.

[13] F. Barquín Vidal, “Análisis de la ponderación de los diferentes parámetros en la producción de las instalaciones fotovoltaicas según PVsyst,” 2019.

- [14] V. L. Acevedo Blanco, "Análisis de tecnologías fotovoltaicas y evaluación de sistemas solares fotovoltaicos conectados a red y autónomos utilizando la herramienta de simulación PVSYSST: sistema híbrido de 4, 2KWP en Bogotá," 2013.
- [15] R. Román Sánchez-Mateos, "Simulación y comparación experimental del funcionamiento de centrales fotovoltaicas conectadas a la red," 2017.
- [16] V. Castro Landínez, "Evaluación del desempeño del sistema solar fotovoltaico implementado en el edificio santo domingo de la universidad de los Andes mediante un modelo computacional," 2020.
- [17] A. R. García Villar, "Revisión de herramientas de ayuda al cálculo de viabilidad, diseño y simulación de sistemas fotovoltaicos," 2021.
- [18] R. D. Hernández López, "Análisis de los datos y simulación de las plantas fotovoltaicas instaladas en la Universidade da Coruña," 2019.
- [19] L. Romero Esteban, "Modelado energético con PVsyst de seis sistemas fotovoltaicos situados en la cubierta de la ETSIDI," 2017.
- [20] E. Alvarez Claro, A. Ruedas Rodríguez, E. Sánchez Lobo, D. Sánchez Quintana y F. Regino Urbanes. "Diseño de una planta solar fotovoltaica para la alimentación de un banco de luces de aterrizaje en el batallón de infantería N° 15 general Santander Ocaña", en Segundo Congreso Latinoamericano de Ingeniería, pp. 4-6, 2019.
- [21] University of Genova, PVsyst, "simulation software for photovoltaic systems," 2021. [Online]. Available: <https://www.pvsyst.com/>
- [22] ASEP, "Reporte de demanda energética semestral 2019," República de Panamá, 2019. [Online]. Available: https://www.asep.gob.pa/wp-content/uploads/electricidad/estadisticas/2019/segundo_se_mestre/demanda.pdf.
- [23] A. Gracia Amillo, T. Huld, P. Vourlioti, R. Müller, M. Norton, "Application of Satellite-Based Spectrally-Resolved Solar Radiation Data to PV Performance Studies," *Energies*, vol.8, no.5, pp. 3455-3488, abr. 2015.
- [24] M. Pérez Martínez, I. C. Morales Rodríguez, & E. Castro, "La hora solar pico equivalente: Definición e interpretación. Ingeniería Energética," 38(2), pp. 124-131, 2017.
- [25] Universidad Carlos III de Madrid, "Diseño de una planta solar fotovoltaica de conexión a la red," sep. 2015. [Online]. Available: <https://ingemecanica.com/proyectos/objetos/proyecto141.pdf>
- [26] Ingeniería mecánica, "Cálculo y diseño de una instalación solar fotovoltaica para autoconsumo en vivienda," sep. 2017. [Online]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorial192.html>.
- [27] L. Barrera, E. Cortés, M. Méndez, J. Mendoza and V. Domínguez, "Energías no convencionales: eólica y fotovoltaica aplicadas a las regiones secas de Panamá," *Revista de Iniciación científica*, vol. 2017, no. 3, pp. 56-63, jul. 2017.
- [28] Global solar atlas 2.0, Solargis 2.1., "Mapa de recurso solar de irradiación global horizontal en Panamá," 2021. [Online]. Available: <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/panama>.
- [29] M. Gutiérrez Vargas, "Manual de instalación y mantenimiento de sistemas solares fotovoltaicos," 2022.
- [30] J. A. Alonso Lorenzo, "Instalación Fotovoltaica Aislada - ¿Cómo se calcula paso a paso? SunFields," 2021. [Online]. Available: <https://www.sfe-solar.com/baterias-solares/manual-calculo/>.
- [31] M. A. Paternina, L.C. Villalba, J.L. Nuñez, & R.A. López, "Diseño de prototipo de sistema solar fotovoltaico optimizando el ángulo de inclinación de los paneles solares. Prospectiva," vol.10(1), pp. 97-107, 2012.
- [32] Autosolar Energy Solutions, "Afectación por las sombras en los panels solares," jun. 2018. [Online]. Available: <https://autosolar.es/blog/eficiencia-energetica/como-afectan-las-sombras-en-los-paneles-solares>.
- [33] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie International Solar Energy Society, "Curso sistemas solares fotovoltaicos conectados a la red," German Section, (2011). [Online]. Available: https://ingemecanica.com/cursos_online/curso_ref012.html.
- [34] W. S. Chandler, C. H. Whitlock, and P. W. Stackhouse, "NASA Climatological Data for Renewable Energy Assessment," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 126, pp. 945-949, 2004.
- [35] Ministerio de Ambiente, "Segundo informe bienal de actualización la mitigación del cambio climático en panamá", pp. 68-72, 2021.
- [36] L. Yu, & P. Gong, "Google Earth as a virtual globe tool for Earth science applications at the global scale: progress and perspectives," *International Journal of Remote Sensing*, 33(12), 3966-3986, (2012).
- [37] PVGIS, "Photovoltaic Geographical Information System," Joint Research Centre, [Online]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>.
- [38] IRENA, "Global Atlas for Renewable Energy, datos del mapa: 3TIER 2015," 2020. [Online]. Available: www.irena.org/globalatlas.
- [39] AutoSolar, "Cómo afectan las sombras en los paneles solares," jul. 2021. [Online]. Available: <https://autosolar.es/placas-fotovoltaicas/como-afectan-las-sombras-en-los-paneles-solares>.
- [40] SNE, "Plan energético nacional 2015-2050," República de Panamá, abr. 2016. [Online]. Available: <https://www.senacyt.gob.pa/wp-content/uploads/2018/12/3.-Plan-Energetico-Nacional-2015-2050-1.pdf>.

- [41] G. Lueders, “Estudo comparativo de performance de um sistema fotovoltaico utilizando as bases solarimétricas PVGIS, NASA e Meteonorm,” 2019. [Online]. Available: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/200156> (accessed Jun. 01, 2022).
- [42] M. K. Da Silva, D. I. Narvaez, K. B. De Melo, and M. G. Villalva, “Comparative analysis of transposition models applied to photovoltaic systems using meteonorm and NASA SSE databases,” 2018 13th IEEE Int. Conf. Ind. Appl. INDUSCON 2018 - Proc., pp. 237–241, jan. 2019, doi: 10.1109/INDUSCON.2018.8627354.
- [43] B. O. Mejia Vasquez, “Algoritmos genéricos para el diseño de una minicentral eléctrica solar utilizando una interfaz de programación,” Universidad Señor de Sipain, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, TESIS, 2019. [Online]. Available: [https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/6329/Olive Mejia Vasquez.pdf](https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/6329/Olive_Mejia_Vasquez.pdf).
- [44] S. A. Pelaez and C. Deline, “Bifacial_radiance: a python package for modeling bifacial solar photovoltaic systems,” may. 2020, doi: 10.5281/ZENODO.3860350.
- [45] F. Barquín Vidal, “Análisis de la ponderación de los diferentes parámetros en la producción de las instalaciones fotovoltaicas según PVsyst,” U. Sevilla. Grado en Ingeniería de la Energía, 2019. [Online]. Available: <https://idus.us.es/handle/11441/101950>.
- [46] M. Moreno González, “Modelado de sistemas fotovoltaicos de concentración para la biblioteca de código abierto PVLIB-Python,” U. Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial, trabajo fin de grado, sep. 2019. [Online]. Available: [https://oa.upm.es/63168/1/TFG Marcos Moreno.pdf](https://oa.upm.es/63168/1/TFG_Marcos_Moreno.pdf).



Producción de pimiento (*Capsicum annuum*): comparación entre tipos de pimiento

Sweet pepper (*Capsicum annuum*) production: comparison between types of sweet pepper

José E. Monge-Pérez ^{1*} , Esteban Elizondo-Cabalceta ² , Michelle Loria-Coto ³ 

¹ Universidad de Costa Rica, Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos, Costa Rica

² Instituto Nacional de Aprendizaje, Núcleo Agropecuario, Costa Rica

³ Universidad Estatal a Distancia, Escuela de Ciencias Exactas y Naturales, Costa Rica

jose.mongeperez@ucr.ac.cr; eelizondocabalceta@ina.ac.cr; mloria@uned.ac.cr

Fecha de recepción: 14 de marzo de 2022; Fecha de aprobación: 1 de julio de 2022.

*Autor de correspondencia: José E. Monge-Pérez (jose.mongeperez@ucr.ac.cr)

RESUMEN. Objetivos: realizar una comparación a nivel agronómico entre tres tipos de pimiento (cónico, cuadrado, y rectangular), producidos bajo ambiente protegido. Metodología: se usó fibra de coco como sustrato, y se aplicó fertirrigación; se evaluaron las siguientes variables: altura de la planta (AP), área de la hoja (AH), diámetro de tallo (DT), longitud del tallo (LT), longitud de fruto (LF), ancho del fruto (AF), relación longitud/ancho del fruto (L/A), espesor del pericarpio (EP), edad al inicio de la cosecha (EIC), número de frutos por planta (NFP), peso promedio del fruto (PF), y rendimiento comercial (RC) y total (RT). Resultados: en relación con los otros tipos de pimiento, el pimiento cónico presentó el menor PF, AF y EP, y la mayor L/A y NFP totales. Además, el pimiento cuadrado presentó la menor AP, AH, LF y L/A, y el mayor AF y EP. No se presentaron diferencias significativas en DT, EIC, NFP de primera calidad, ni RT ni RC, entre los diferentes tipos de pimiento. Conclusiones: la opción más rentable para los agricultores en Costa Rica parece ser el cultivo de pimiento cuadrado, debido a que sus frutos tienen un precio que duplican el del pimiento cónico, aunque el tamaño del mercado es menor.

Palabras clave. *Calidad, forma del fruto, peso del fruto, rendimiento.*

ABSTRACT. Objectives: to compare three sweet pepper types (conical, square, and rectangular) grown under protected conditions. Methodology: the crop was grown on coconut fiber as a substrate, and managed with fertigation, and the following variables were evaluated: plant height (PH), leaf area (LA), stem diameter (SD), stem length (SL), fruit length (FL), fruit width (FW), fruit length/width ratio (L/W), pericarp thickness (PT), age at harvest start (AHS), number of fruits per plant (NFP), average fruit weight (AFW), and commercial (CY) and total yield (TY). Results: compared to the other sweet pepper types in this evaluation, conical peppers showed the lowest AFW, FW and PT, as well as the highest L/W and total NFP. On the other hand, square peppers showed the lowest PH, LA, FL and L/W, as well as the highest FW and PT. There were no significant differences between sweet pepper types for the following variables: SD, AHS, NFP of first quality, and TY and CY. Conclusions: square pepper production may be the best option for growers in Costa Rica as fruit prices double that of conical pepper, but its market size is smaller.

Keywords. *Quality, fruit shape, fruit weight, yield.*

1. Introducción

El pimiento (*Capsicum annuum* L.) es una especie que pertenece a la familia Solanaceae, y es una de las hortalizas más populares, cuyo origen es Centro y Suramérica [1]; es un cultivo que se siembra en grandes áreas en todas las zonas del mundo, y posee una gran

variabilidad de cultivares [2]. Además, es un importante cultivo bajo invernadero en muchos países [3].

Existen dos componentes químicos de la especie *C. annuum* que le dan valor especial: la capsantina, que brinda el color rojo del fruto a muchas variedades; y la capsicina, que le da la pungencia a ciertos cultivares [4]. Por el contrario, el pimiento cuyos frutos no son

pungentes (llamado “chile dulce” en ciertos países) se caracteriza por su ausencia de capsaicina [5].

El pimiento es una especie apreciada por su aroma, color y sabor; el fruto se usa como hortaliza cocida y en ensaladas, y representa un componente importante del mercado mundial de hortalizas frescas [6].

El fruto de pimiento es una baya hueca, que cuando está joven presenta un color verde o morado, para finalmente virar a color rojo, amarillo, violáceo, anaranjado, o morado-negruzco; este es el color de la parte comestible, las paredes exteriores (pericarpio) [5].

De acuerdo a la forma del fruto, el pimiento se clasifica en tres tipos principales: cónico, cuadrado y rectangular. El pimiento tipo cónico presenta un fruto con punta alargada, su peso varía entre 150 y 350 g, y son de color rojo o amarillo [3]. Por otra parte, los frutos de los pimientos tipo cuadrado y rectangular terminan en cuatro puntas, y sus colores pueden ser rojo, amarillo o anaranjado [7]. Generalmente cada país cuenta con sus propias normas de clasificación por calidad; en el mercado nacional de Costa Rica se utiliza el tamaño del fruto para diferenciar entre la calidad primera, segunda y tercera [7].

En Europa, los pimientos cuadrados se subdividen en cuadrado americano, cuadrado holandés y cuadrado italiano, según las características de los hombros y los ápices [5]. Los pimientos rectangulares se subdividen en rectangular $\frac{1}{2}$ largo, rectangular $\frac{3}{4}$ largo y rectangular largo, y al pimiento cónico se le conoce como tipo dulce italiano [5].

El cultivo de pimiento en Costa Rica se lleva a cabo principalmente por pequeños y medianos agricultores, con un nivel medio de tecnificación del cultivo. El pimiento es un componente importante de la dieta de la población de ese país (3,5 kg/per capita/año), y su consumo es importante dado su contenido de potasio, manganeso, molibdeno, ácido fólico, fibra dietética, vitamina C, vitamina A, vitamina B6, y vitamina K. En el año 2014 se exportaron 1,374 toneladas métricas al mercado norteamericano [36].

Sin embargo, hasta el momento no se ha realizado un estudio comparativo entre la producción de los diferentes tipos de pimiento en Costa Rica.

El objetivo de este trabajo fue cuantificar el rendimiento y la calidad de tres tipos de pimiento, según la forma del fruto, cultivados bajo ambiente protegido.

2. Materiales y métodos

El ensayo se llevó a cabo desde julio 2010 a abril 2011, en la ‘Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno’ de la Universidad de Costa Rica, localizada en el cantón Central, Alajuela, Costa Rica, a una altitud de 883msnm.

El ensayo se ubicó en un invernadero con techo de plástico, tipo multicapilla. Se incluyeron en total 27 híbridos de pimiento (*Capsicum annum* L.), que corresponden a tres tipos, según la morfología del fruto: rectangular (2 híbridos), cuadrado (13 híbridos) y cónico (12 híbridos) (tabla 1).

Tabla 1. Híbridos de pimiento.

Tipo de pimiento	Híbrido
Cónico	Cortés (Francia); FBM-1 (Costa Rica); FBM-2 (Costa Rica); FBM-3 (Costa Rica); FBM-7 (Costa Rica); FBM-11 (Costa Rica); FBM-12 (Costa Rica); Jumbo (Costa Rica); Lamuyo Amarillo (Costa Rica); Lamuyo Experimental (Costa Rica); Tiquicia (Costa Rica); V-701 (Francia)
Cuadrado	Amarillo Americano (Costa Rica); MACR-101-07 (Tailandia); MACR-102-07 (Tailandia); MACR-103-07 (Tailandia); MACR-104-07 (Tailandia); MACR-105-07 (Tailandia); Magno (Holanda); Oberon (Holanda); Rojo Americano (Costa Rica); Sweet Pepper Red (Taiwán); Vikingo (Japón); XPPAD-169 (Japón); XPPAD-286 (Japón)
Rectangular	Estrella (España); XC-425 (Francia)

Nota: El nombre entre paréntesis corresponde al país de procedencia de cada híbrido.

La siembra del almácigo se llevó a cabo en bandejas de germinación de plástico, de 128 alvéolos. El trasplante de las plántulas se hizo 43 días después de la siembra, en bolsas plásticas rellenas con sustrato de fibra

de coco molida, con una longitud de 1 m. Se usó una densidad de siembra de 2.60 plantas/m². Las plantas recibieron poda española, y se usó riego por goteo para el aporte de agua y nutrientes.

La cosecha inició en noviembre 2010 y finalizó en abril 2011, y se hizo en forma semanal. Los frutos se cosecharon cuando mostraron coloraciones rojas, amarillas o anaranjadas en la cáscara (según el híbrido). Los frutos se clasificaron en tres categorías de calidad (primera, segunda y rechazo), de acuerdo con los parámetros establecidos para cada tipo de pimiento en otra investigación [35].

Se evaluaron las siguientes variables, según la metodología descrita en otro trabajo [35]: altura de la planta (AP, en m), área de la hoja (AH, en cm²), diámetro del tallo (DT, en mm), longitud del tallo (LT, en cm), ancho del fruto (AF, en cm), longitud del fruto (LF, en cm), relación longitud/ancho del fruto, espesor del pericarpio (EP, en mm), edad al inicio de la cosecha (EIC, en ddt), número de frutos por planta (NFP), peso promedio del fruto (PF, en g), y rendimiento comercial (RC) y total (RT, en ton/ha).

El diseño experimental fue irrestricto aleatorio; los tratamientos correspondieron a cada tipología de pimiento (tres tipos); y las repeticiones consistieron en cada híbrido (27 en total). La unidad experimental (parcela) estuvo formada por dos bolsas con cuatro plantas cada una (ocho plantas en total), y la parcela útil consistió en las cuatro plantas centrales de la unidad experimental. Se aplicó un análisis estadístico de varianza, y para determinar diferencias entre tratamientos se usó la prueba de LSD Fisher ($p \leq 0.05$).

3. Resultados y discusión

El pimiento cuadrado presentó una AP significativamente menor, en relación con los otros tipos de pimiento (figura 1). No se hallaron diferencias significativas entre el pimiento rectangular y el cónico para esta variable.

Los resultados obtenidos para esta característica se ubicaron dentro del rango hallado por otros investigadores en pimiento, quienes indican que la AP puede variar entre 0.49 y 2.24m [8-15].

El pimiento cuadrado mostró un AH significativamente menor, en relación con los otros dos

tipos de pimiento (figura 2). No se encontraron diferencias significativas entre el pimiento rectangular y el cónico para esta variable. Otros investigadores hallaron para pimiento rectangular, un AH entre 14.53 y 41.68cm², por lo que los resultados obtenidos en el presente ensayo fueron superiores [16].

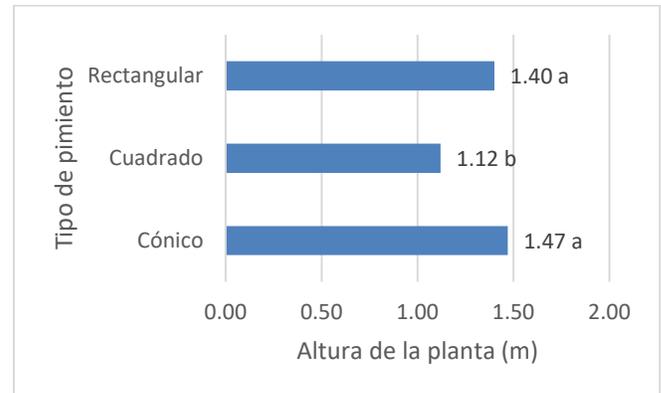


Figura 1. AP a los 209ddt, según tipo de pimiento. **Nota:** no hay diferencias significativas entre tratamientos que muestran una letra en común, según prueba LSD Fisher ($p \leq 0.05$).

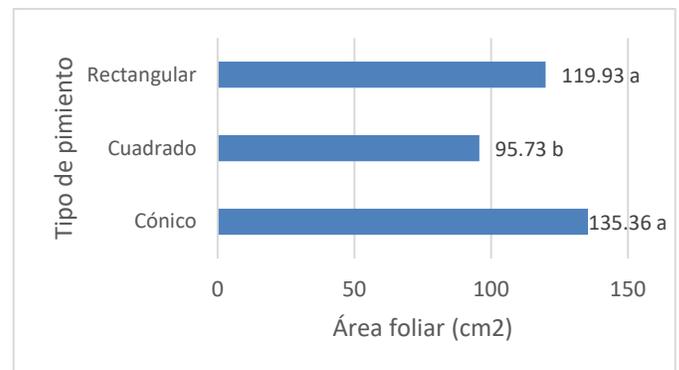


Figura 2. AH, según tipo de pimiento. **Nota:** no hay diferencias significativas entre tratamientos que muestran una letra en común, según prueba LSD Fisher ($p \leq 0.05$).

Para el DT, entre los tipos de pimiento no se registraron diferencias significativas (tabla 2). Con respecto a esta característica, los datos obtenidos coinciden mayoritariamente con los encontrados por otros autores en pimiento, quienes indican que esta variable oscila entre 14.0 y 27.3mm [8], [9], [11], [13]; solamente en el caso del pimiento rectangular se obtuvo un valor ligeramente inferior a lo informado en la literatura.

Tabla 2. DT a los 182ddt, según tipo de pimiento.

Tipo de pimiento	DT (mm)
Cónico	14.75 a
Cuadrado	14.33 a
Rectangular	13.44 a

Nota: no hay diferencias significativas entre tratamientos que muestran una letra en común, según prueba LSD Fisher ($p \leq 0.05$).

Con respecto a LT (figura 3), el pimiento cónico mostró un valor significativamente superior con respecto al pimiento cuadrado, mientras que el pimiento rectangular mostró un valor intermedio para esta variable. Los resultados obtenidos coinciden con los hallados por otros investigadores, quienes informaron que la LT en pimiento varió entre 19.4 y 33.0mm [11].

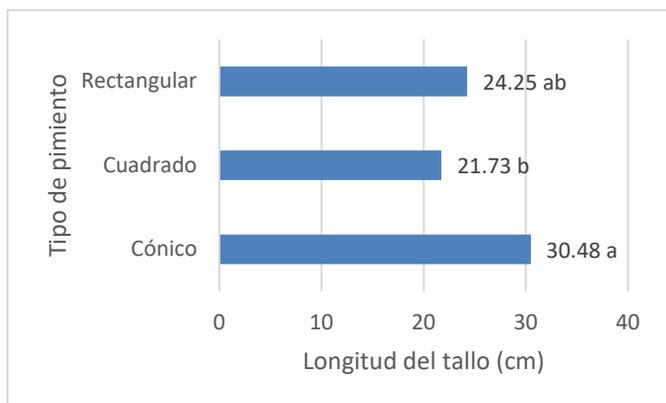


Figura 3. LT a los 48ddt, según tipo de pimiento. **Nota:** no hay diferencias significativas entre tratamientos que muestran una letra en común, según prueba LSD Fisher ($p \leq 0.05$).

En relación con AF (figura 4), el pimiento cuadrado presentó frutos significativamente más anchos que los pimientos rectangulares y cónicos; y el pimiento rectangular mostró frutos significativamente más anchos que el pimiento cónico.

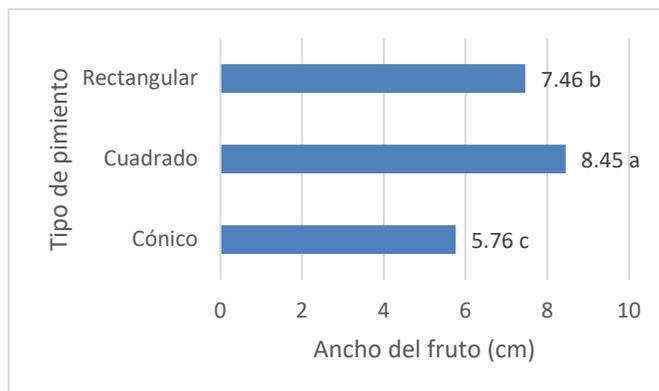


Figura 4. AF, según tipo de pimiento. **Nota:** no hay diferencias significativas entre tratamientos que muestran una letra en común, según prueba LSD Fisher ($p \leq 0.05$).

Los resultados obtenidos se ubicaron dentro del rango informado por otros autores, quienes indican que el AF varía entre 4.14 y 10.20cm para el pimiento cónico; entre 4.14 y 9.02cm para el pimiento rectangular; y entre 5.90 y 10.20cm para el pimiento cuadrado [11], [12], [16-23].

El pimiento cuadrado mostró una LF significativamente menor en relación con los otros tipos de pimiento (figura 5). No hubo diferencias significativas entre los pimientos cónico y rectangular para esta variable.

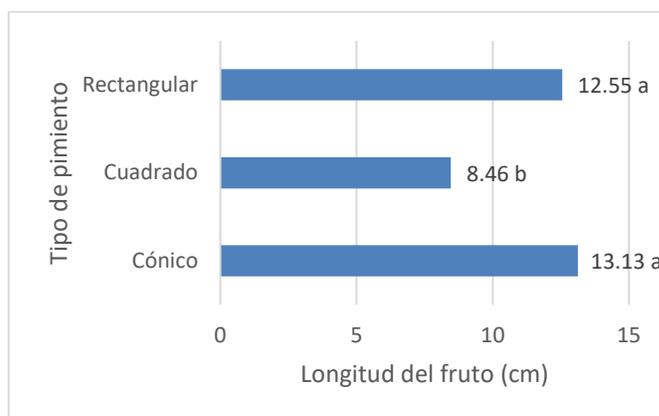


Figura 5. LF, según tipo de pimiento. **Nota:** no hay diferencias significativas entre tratamientos que muestran una letra en común, según prueba LSD Fisher ($p \leq 0.05$).

Los datos obtenidos coinciden con lo informado por otros investigadores, quienes indican que la LF de pimiento varía entre 5.00 y 20.90cm para el pimiento cónico; entre 6.73 y 20.90cm para el pimiento

rectangular; y entre 5.00 y 12.50cm para el pimiento cuadrado [11], [12], [16-23].

Con respecto a L/A (figura 6), esta relación fue significativamente mayor para el pimiento cónico, en contraste con los otros tipos de pimiento; y también esta relación fue significativamente superior para el pimiento rectangular, con respecto al pimiento cuadrado.

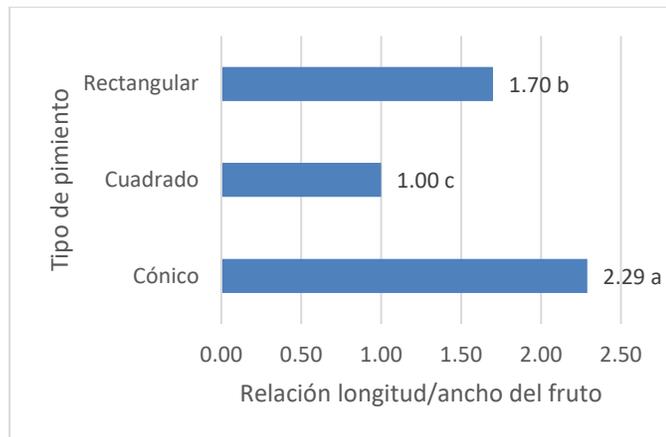


Figura 6. L/A, según tipo de pimiento. **Nota:** no hay diferencias significativas entre tratamientos que muestran una letra en común, según prueba LSD Fisher ($p \leq 0.05$).

El pimiento cuadrado mostró un EP significativamente superior a los otros tipos de pimiento; y el pimiento rectangular mostró un valor significativamente mayor que el pimiento cónico para esta característica (figura 7).

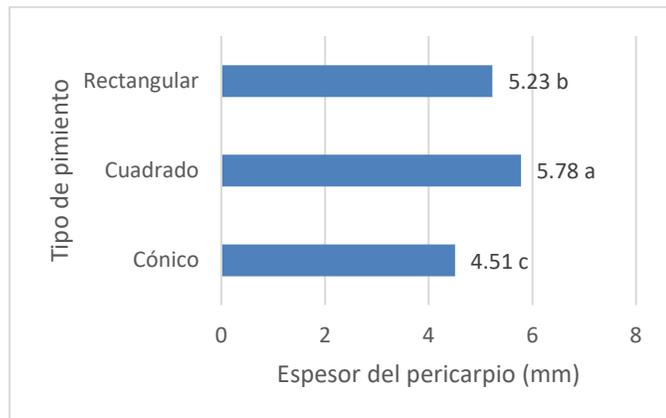


Figura 7. EP, según tipo de pimiento. **Nota:** no hay diferencias significativas entre tratamientos que muestran una letra en común, según prueba LSD Fisher ($p \leq 0.05$).

Los resultados hallados en el presente estudio coinciden con los obtenidos por otro investigador, quien informó que el EP de un pimiento cuadrado fue mayor que el de un pimiento cónico [14]. Los resultados obtenidos para esta variable se ubicaron dentro del rango informado por otros autores, quienes indican que el EP varía entre 3.30 y 8.93mm para el pimiento cónico y rectangular, y entre 5.00 y 8.40mm para el pimiento cuadrado [12], [16], [18-20], [22], [23].

En relación con EIC (tabla 3), entre los tipos de pimiento no se registraron diferencias significativas. Otros investigadores hallaron para pimiento rectangular, una EIC entre 58 y 77 días después de siembra (cultivados a campo abierto mediante siembra directa) [16], por lo que los resultados obtenidos en el presente ensayo fueron superiores, probablemente debido al efecto del trasplante, y a las diferentes condiciones ambientales. Por otra parte, otros autores hallaron para un pimiento cuadrado (no híbrido), que la cosecha inició entre los 133 y 136 días después de siembra (cultivados a campo abierto) [24], por lo que el resultado hallado en la presente investigación fue inferior, probablemente debido al vigor híbrido del material genético evaluado.

En cuanto a NFP (tabla 4), entre los tipos de pimiento no se reportaron diferencias significativas para la primera calidad. El pimiento cónico produjo un NFP total y de segunda calidad significativamente mayor, con relación al pimiento cuadrado y al rectangular; y no se registraron diferencias estadísticamente significativas entre los pimientos cuadrado y rectangular para estas variables. En forma similar a lo hallado en el presente estudio, otro investigador informó que un pimiento cónico presentó también un mayor NFP total que un pimiento cuadrado [14].

Tabla 3. EIC, según tipo de pimiento.

Tipo de pimiento	EIC (ddt)
Cónico	81.2 a
Cuadrado	80.2 a
Rectangular	83.0 a

Nota: no hay diferencias significativas entre tratamientos que muestran una letra en común, según prueba LSD Fisher ($p \leq 0.05$).

Tabla 4. NFP, según tipo de pimiento y categoría de calidad del fruto.

Tipo de pimiento	NFP	
	Total	Categoría de calidad

		Primer	Segunda	Rechazo
Cónico	31.14 a	5.00 a	18.35 a	7.79 a
Cuadrado	17.67 b	4.15 a	8.48 b	5.04 b
Rectangular	20.89 b	5.32 a	10.13 b	5.44 ab

Nota: no hay diferencias significativas entre tratamientos que muestran una letra en común, según prueba LSD Fisher ($p \leq 0.05$).

En el caso del mercado nacional de pimiento en Costa Rica, el componente de rendimiento más importante es el NFP, pues en ese país esta hortaliza se comercializa por unidad, y no por peso; además, los frutos de primera calidad se venden a un precio superior en comparación con los frutos de segunda calidad [15]. Por otra parte, en ese mercado los pimientos cuadrados se venden a un precio mayor que los pimientos cónicos, por lo que aquéllos pueden constituir una buena alternativa de producción en condiciones de invernadero [15]. En mayo 2022, el precio en el mercado nacional de este país oscilaba entre 200 a 300 colones (0.30-0.45 US dólares) por fruto para el pimiento cónico, y entre 500 y 600 colones (0.75-0.90 US dólares) por fruto para el pimiento cuadrado, mientras que la oferta de pimiento rectangular en el mercado era muy baja o nula (J. E. Monge-Pérez, datos sin publicar). Por lo tanto, dado que no se registraron diferencias en el NFP de primera calidad entre los tres tipos de pimiento evaluados, parece que la opción más rentable en este momento para los agricultores es el cultivo de pimiento cuadrado, aunque hay que tomar en cuenta que el tamaño del mercado es menor.

Los resultados obtenidos para el NFP total se ubicaron dentro del rango informado por otros autores para pimiento, de entre 3.19 y 78.7 frutos por planta [9], [11-17], [21], [25-27].

Con respecto a PF (tabla 5), el pimiento cónico presentó un valor significativamente menor, en contraste con los pimientos cuadrado y rectangular, para las tres categorías de calidad. Además, no se reportaron diferencias significativas entre los pimientos cuadrado y rectangular para esta variable, para ninguna categoría de calidad.

Tabla 5. PF, según tipo de pimiento y categoría de calidad del fruto.

Tipo de pimiento	PF (g)		
	Categoría de calidad		
	Primera	Segunda	Rechazo
Cónico	5.00 a	18.35 a	7.79 a
Cuadrado	4.15 a	8.48 b	5.04 b
Rectangular	5.32 a	10.13 b	5.44 ab

Cónico	135.65 b	99.91 b	54.66 b
Cuadrado	207.15 a	158.40 a	88.99 a
Rectangular	212.85 a	159.78 a	88.00 a

Nota: no hay diferencias significativas entre tratamientos que muestran una letra en común, según prueba LSD Fisher ($p \leq 0.05$).

En concordancia con los resultados hallados en el presente estudio, otro autor informó que un pimiento cuadrado presentó frutos de mayor PF que un pimiento cónico [14]. Los datos obtenidos en el presente estudio para el PF coinciden con los hallados por otros autores, quienes indican que esta característica varía entre 98.00 y 280.09 g para los pimientos cuadrado y rectangular, y entre 25.5 y 323.0 g para el pimiento cónico [8], [11-13], [15-23], [25-29], [30].

Con respecto al rendimiento (tabla 6), entre los tipos de pimiento no se presentaron diferencias significativas para RT, RC y rendimiento de rechazo.

Tabla 6. RT, RC y rendimiento de rechazo, según tipo de pimiento.

Tipo de pimiento	Rendimiento (ton/ha)		
	Total	Comercial	Rechazo
Cónico	75.25 a	64.56 a	10.70 a
Cuadrado	68.15 a	56.69 a	11.46 a
Rectangular	80.12 a	68.02 a	12.10 a

Nota: no hay diferencias significativas entre tratamientos que muestran una letra en común, según prueba LSD Fisher ($p \leq 0.05$).

Los resultados obtenidos para el rendimiento se ubicaron dentro del rango informado por otros investigadores en pimiento, quienes indican que el RT varía entre 7.67 y 178.4 ton/ha, y que el RC oscila entre 10.28 y 74.00 ton/ha [8-13], [15], [17], [19], [20], [22], [25-34].

4. Conclusiones

En relación con los otros tipos de pimiento, el pimiento cónico presentó el menor PF, AF y EP, y la mayor L/A y NFP totales.

Además, el pimiento cuadrado presentó la menor AP, AH, LF y L/A, y el mayor AF y EP.

No se presentaron diferencias significativas en DT, EIC, NFP de primera calidad, ni el RT ni RC, entre los diferentes tipos de pimiento.

La opción más rentable para los agricultores en Costa Rica en este momento parece ser el cultivo de pimiento

cuadrado, debido a que sus frutos tienen un precio que duplican el del pimiento cónico, aunque el tamaño del mercado es menor.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento concedido por la Universidad de Florida y la Universidad de Costa Rica, y la revisión de Mario Monge de la traducción al idioma inglés del resumen.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

J.E.M.P. colaboró en el trabajo de campo, recolección y análisis de datos, y redacción del documento.

E.E.C. colaboró en el trabajo de campo, recolección y análisis de datos, y redacción del documento.

M.L.C. colaboró en el análisis de datos.

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] H. Rokib, A. Matin, A. Nazmul, B. Abul y H. A. Mahmudul, «Genetic association analysis and selection indices for yield attributing traits in available chilli (*Capsicum annuum* L.) genotypes,» *Molecular Plant Breeding*, vol. 7, n° 19, pp. 1-9, 2016.
- [2] E. Madosa, S. Ciulca, G. Velicevici, C. Avadanei, L. Sasu, A. Cioroga y I. Friskan, «Study of correlations between component characters of production capacity of sweet pepper (*Capsicum annuum* L. var. *grossum*),» *Bulletin UASVM, Horticulture*, vol. 65, n° 1, pp. 90-94, 2008.
- [3] E. Elizondo-Cabalceta y J. E. Monge-Pérez, «Caracterización morfológica de 15 genotipos de pimiento (*Capsicum annuum*) cultivados bajo invernadero en Costa Rica,» *InterSedes*, vol. 18, n° 37, pp. 1-27, 2017.
- [4] M. K. Bundela, S. C. Pant, Madhuri y K. Singh, «Correlation and path coefficient analysis in chilli (*Capsicum annuum* L.) for yield and yield attributing traits,» *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, vol. 7, n° 11, pp. 65-70, 2018.
- [5] A. Milla, «Capsicum de capsula, cápsula: el pimiento,» de *Pimientos*, vol. Compendios de Horticultura 9, Reus, Ediciones de Horticultura, 1996, pp. 21-32.
- [6] S. Roy, S. Chatterjee, M. A. Hossain, S. Basfore y C. Karak, «Path analysis study and morphological characterization of sweet pepper (*Capsicum annuum* L. var. *grossum*),» *International Journal of Chemical Studies*, vol. 7, n° 1, pp. 1777-1784, 2019.
- [7] U. Jiménez, H. Campos, J. Vicente, S. Marín, L. Barrantes y M. Carrillo, «Agrocadena regional: cultivo del chile dulce,» Ministerio de Agricultura y Ganadería, Grecia, Alajuela, Costa Rica, 2007.
- [8] R. L. Grijalva-Contreras, R. Macías-Duarte y F. Robles-Contreras, «Productividad y calidad de variedades y densidades de chile bell pepper bajo condiciones de invernadero en el Noroeste de Sonora,» *Biotecnia*, vol. 10, n° 3, pp. 3-10, 2008.
- [9] E. Jovicich, D. J. Cantliffe y G. J. Hochmuth, «Plant density and shoot pruning on yield and quality of a summer greenhouse sweet pepper crop in Northcentral Florida,» de *Proceedings 28th National Agricultural Plastics Congress*, 19-22 May, Tallahassee, Florida, EE.UU., 1999.
- [10] E. Jovicich, D. J. Cantliffe y P. J. Stoffella, «Fruit yield and quality of greenhouse-grown bell pepper as influenced by density, container, and trellis system,» *Hort Technology*, vol. 14, n° 4, pp. 507-513, 2004.
- [11] E. C. Moreno, R. Mora, F. Sánchez y V. García-Pérez, «Fenología y rendimiento de híbridos de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) cultivados en hidroponía,» *Revista Chapingo Serie Horticultura*, vol. 17, n° edición especial 2, pp. 5-18, 2011.
- [12] I. Paunero, «Evaluación de cultivares de pimiento 2006/07,» Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, San Pedro, Argentina, 2008.
- [13] R. C. Reséndiz-Melgar, E. C. Moreno-Pérez, F. Sánchez-Del Castillo, J. E. Rodríguez-Pérez y A. Peña-Lomelí, «Variedades de pimiento morrón manejadas con despunte temprano en dos densidades de población,» *Revista Chapingo Serie Horticultura*, vol. 16, n° 3, pp. 223-229, 2010.
- [14] G. Quesada, «Producción de chile dulce en invernadero bajo diferentes niveles de agotamiento en la humedad del sustrato,» *Agronomía Costarricense*, vol. 39, n° 1, pp. 25-36, 2015.
- [15] J. E. Monge-Pérez, «Efecto de la poda y la densidad de siembra sobre el rendimiento y calidad del pimiento cuadrado (*Capsicum annuum* L.) cultivado bajo invernadero en Costa Rica,» *Tecnología en Marcha*, vol. 29, n° 2, pp. 125-136, 2016.
- [16] V. K. Sharma, C. S. Semwal y S. P. Uniyal, «Genetic variability and character association analysis in bell pepper (*Capsicum annuum* L.),» *Journal of Horticulture and Forestry*, vol. 2, n° 3, pp. 58-65, 2010.
- [17] H. Y. Dasgan y K. Abak, «Effects of plant density and number of shoots on yield and fruit characteristics of

- peppers grown in glasshouses,» *Turkish Journal of Agriculture & Forestry*, vol. 27, pp. 29-35, 2003.
- [18] M. G. Hutton y D. T. Handley, «Bell pepper cultivar performance under short, variable growing season,» *Hort Technology*, vol. 17, n° 1, pp. 136-141, 2007.
- [19] J. I. Macua, I. Lahoz, S. Calvillo y L. Orcaray, «Pimientos California y Lamuyo; variedades y colores campaña 2009,» *Navarra Agraria*, n° Enero-Febrero, pp. 32-36, 2010.
- [20] A. M. Mahmoud y A. A. El-Eslamboly, «Production and evaluation of high yielding sweet pepper hybrids under greenhouse conditions,» *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, vol. 15, n° 4, pp. 573-580, 2015.
- [21] N. J. Montaña y H. D. Belisario, «Comportamiento agronómico de siete cultivares de pimentón (*Capsicum annuum* L.),» *Revista Científica UDO Agrícola*, vol. 12, n° 1, pp. 32-44, 2012.
- [22] N. L. Shaw y D. J. Cantliffe, «Brightly colored pepper cultivars for greenhouse production in Florida,» *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, vol. 115, pp. 236-241, 2002.
- [23] M. Aranguiz, «Efecto de tres sistemas de poda sobre el rendimiento, calidad y asimilados en dos cultivares de pimiento (*Capsicum annuum* var. *grossum* L.) producidos orgánicamente bajo invernadero,» *Escuela de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Talca, Talca, Chile*, 2002.
- [24] A. Ben-Chaim y I. Paran, «Genetic analysis of quantitative traits in pepper (*Capsicum annuum*),» *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 125, n° 1, pp. 66-70, 2000.
- [25] J. Borosic, B. Benko, S. Fabek, B. Novak, N. Dobricevic y L. Bucan, «Agronomic traits of soilless grown bell pepper,» *Acta Horticulturae*, vol. 927, pp. 421-428, 2012.
- [26] N. Cruz-Huerta, F. Sánchez, J. Ortiz y M. C. Mendoza, «Altas densidades con despunte temprano en rendimiento y período de cosecha en chile pimiento,» *Agricultura Técnica en México*, vol. 35, n° 1, pp. 70-77, 2009.
- [27] M. A. Wahb-Allah, «Responses of some bell-pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivars to salt stress under greenhouse conditions,» *Journal of Agricultural & Environmental Sciences of Damanshour University*, vol. 12, n° 1, pp. 1-19, 2013.
- [28] S. Seifi, S. H. Nemati, M. Shoor y B. Abedi, «The effect of plant density and shoot pruning on growth and yield of two greenhouse bell pepper cultivars,» *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, vol. 3, n° 11, pp. 77-83, 2012.
- [29] F. E. Vicente-Conesa, L. F. Condés-Rodríguez, M. J. Sáez-García y A. J. García-García, «Valoración de densidades y eliminación de tallos y frutos en cultivo de pimiento tipo California,» de 34 Seminario de Técnicos y Especialistas en Horticultura, Murcia, 2004, Murcia, España, 2005.
- [30] G. Aguado, J. A. Del Castillo, A. Uribarri, J. S. Galdeano y S. Sádaba, «Pimiento tipo Lamuyo en hidroponía,» *Navarra Agraria*, n° Marzo-Abril, pp. 33-37, 2007.
- [31] M. M. Maboko, C. P. Du Plooy y S. Chiloane, «Effect of plant population, stem and flower pruning on hydroponically grown sweet pepper in a shadenet structure,» *African Journal of Agricultural Research*, vol. 7, n° 11, pp. 1742-1748, 2012.
- [32] M. H. Aminifard, H. Aroiee, A. Ameri y H. Fatemi, «Effect of plant density and nitrogen fertilizer on growth, yield and fruit quality of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.),» *African Journal of Agricultural Research*, vol. 7, n° 6, pp. 859-866, 2012.
- [33] D. Maniutiu, R. Sima, A. S. Apahidean, M. Apahidean y D. Ficior, «The influence of plant density and shoot pruning on yield of bell pepper cultivated in plastic tunnel,» *Bulletin UASVM Horticulture*, vol. 67, n° 1, pp. 259-263, 2010.
- [34] O. I. Monsalve, H. A. Casilimas y C. R. Bojacá, «Evaluación técnica y económica del pepino y el pimentón como alternativas al tomate bajo invernadero,» *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, vol. 5, n° 1, pp. 69-82, 2011.
- [35] J. E. Monge-Pérez, E. Elizondo-Cabalceta y M. Loria-Coto, «Correlación y análisis de coeficiente de sendero en chile dulce (*Capsicum annuum* L.) cultivado bajo invernadero,» *Tecnología en Marcha*, vol. 35, n° 1, pp. 128-139, 2022.
- [36] J. Mora, C. R. Echandi, L. F. Barrantes y K. Bonilla, «Manual técnico basado en experiencias con el híbrido "Dulcítico" (*Capsicum annuum*),» *Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, San José, Costa Rica*, 2018.

Combinando el método de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales para la detección de niveles freáticos someros en el noroccidente del Istmo de Panamá

Combining the seismic refraction method and multichannel analysis of surface waves for detection of shallow water-table in the northwestern Isthmus of Panama

Alexis Mojica ^{1,2*} , Osiris Cubilla ³ , Eduardo Silva ³ , José Ladrón-De Guevara ⁴ , Alberto Ruíz ⁵ , Carlos A. Ho ¹ ,
Jaime Toral ⁶ 

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, Laboratorio de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Centro Experimental de Ingeniería, Panamá

² Sistema Nacional de Investigación (SNI), SENACYT, Panamá.

³ 3P Sociedad Ltda., Panamá.

⁴ Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ciencias y Tecnología, Panamá.

⁵ Fundación INDICRI, Panamá.

⁶ Universidad Nacional Autónoma de Chiriquí, Panamá.

alexis.mojica@utp.ac.pa; osiris.cubilla.1986@gmail.com; silvasan@cwpanama.net; cheoldg.13@gmail.com; einstein40@gmail.com; carlos.ho@utp.ac.pa; jaime.toral@gmail.com

Fecha de recepción: 27 de abril de 2022; Fecha de aprobación: 6 de mayo de 2022.

***Autor de correspondencia:** Alexis Mojica (alexis.mojica@utp.ac.pa)

RESUMEN. En el año 2017, se realizaron una serie de estudios geofísicos en la comunidad de Finca 30, provincia de Bocas del Toro, noroccidente de Panamá y cuyo objetivo se focalizó en evaluar el uso combinado de los resultados obtenidos a través de la refracción sísmica (velocidad de onda P) y el análisis multicanal de ondas superficiales (velocidad de onda S) vía el cociente de Poisson para la detección de capas freáticas someras en el sitio de estudio. En esta comunidad se estableció un perfil de 30 m de longitud en donde se utilizó un sismógrafo para estudios de onda P y S, con 16 geófonos de alta frecuencia para el primero y 12 de baja frecuencia para el segundo y adicionalmente, un prototipo de inyección de corriente alterna de 400 V con un arreglo tipo Schlumberger a fin de verificar los resultados de la prospección sísmica; el procedimiento para estudios de onda P se basaron en la norma ASTM D5777-18, para el de onda S en el documento sobre el proyecto InterPACIFIC, y para el sondeo eléctrico, la norma ASTM D6431-18. El rango de valores del cociente de Poisson obtenido (0.47-0.49), y 10.7 ohm.m a una profundidad de 1.8 m sugieren la existencia de una zona saturada la cual fue corroborada a través de una perforación desarrollada en el sitio. Gracias a estos resultados, los acuíferos superficiales podrían ser aprovechados para abastecimiento de la población y para evaluar el nivel de afectación de la capacidad portante para futuros proyectos de ingeniería civil.

Palabras clave. *Análisis multicanal de ondas superficiales, Bocas del Toro, coeficiente de Poisson, nivel freático, refracción sísmica, resistividad eléctrica.*

ABSTRACT. In 2017, a series of geophysical surveys were carried out in the community of Finca 30, province of Bocas del Toro, north-western Panama and whose aim was focused on evaluating the combined use of the results obtained through seismic refraction (P-wave velocity) and multichannel analysis of surface waves (S-wave velocity) via Poisson's ratio for the detection of shallow water-table at the site. In this community, a 30-m-long profile was established where a seismograph was used for P and S wave studies, with 16 high-frequency geophones for the first and 12 low-frequency geophones for the second, and additionally, a AC electrical current injection prototype of 400 V with a Schlumberger type array in order to verify the results of the seismic survey; the procedure for P-wave studies was based on the ASTM D5777-18 standard, for the S-wave study in document of InterPACIFIC project, and for the electrical sounding, the ASTM D6431-18 standard. The range of Poisson's ratio values obtained (0.47-0.49), and 10.7 ohm.m at 1.8 m of depth suggest the existence of a saturated zone which was corroborated through a borehole developed at the

site. Thanks to these results, the shallow aquifers could be used to supply the population and to evaluate the level of affectation of the bearing capacity for future civil engineering projects.

Keywords. *Multichannel analysis of surface waves, Bocas del Toro, Poisson ratio, water-table, seismic refraction, electrical resistivity.*

1. Introducción

El desarrollo de proyectos de ingeniería civil en áreas de suelos compuestos por sedimentos no consolidados y saturados, podrían representar un riesgo significativo ya que pueden verse afectados de forma natural debido no solamente a la amplificación sísmica y licuación que experimentan al encontrarse en una región sísmicamente activa sino también por la presencia de acuíferos superficiales. Ante este tipo de escenarios, los métodos geofísicos pueden jugar un papel importante debido a la rápida adquisición de los datos en campo, la cobertura en extensión y su alto nivel de confiabilidad, así como el bajo costo que representa; hecho que se traduce en una optimización de recursos económico y humano. En estudios hidrogeológicos, los métodos eléctricos y electromagnéticos han sido los más empleados [1], [2] y en Panamá, se han desarrollado algunos proyectos que contemplan la aplicación de estas técnicas a estudios hidrogeológicos e hidrológicos [3-10]; sin embargo, los métodos sísmicos no han sido ampliamente utilizados en este tipo de estudios.

En muchos casos, el uso independiente de la refracción sísmica para la obtención de modelos de terreno en base a las velocidades de onda de compresión u ondas P (V_p), y del análisis multicanal de ondas superficiales MASW para obtener modelos de terreno en función de las velocidades de las ondas de cizalla u ondas S (V_s), no conllevan a un amplio conocimiento de los parámetros que definen un entorno hidrogeológico dado; no obstante, el análisis de las razones V_p/V_s y Poisson, podrían ser clave para la detección del nivel freático de acuíferos superficiales [11], [12], [13].

El objetivo de este trabajo se centra en aplicar por primera vez esta nueva técnica de métodos combinados a fin de detectar el nivel freático en un área ubicada al sureste de la ciudad de Changuinola, provincia de Bocas del Toro. Para esto, se utilizarán los resultados de los procesos de inversión correspondiente al análisis de los tiempos de llegada de las ondas refractadas y directas

empleando el time-term inversion method, y la inversión de la curva de dispersión de velocidad de fase de las ondas superficiales a través del algoritmo neighborhood; de forma paralela, un sondeo eléctrico fue realizado en el sitio de interés.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción del sitio de interés

El sector noroccidental del Istmo de Panamá (específicamente en la provincia de Bocas del Toro) se caracteriza por presentar desde finales del siglo antepasado, una alta inversión y desarrollo de la productividad agrícola bananera y gran parte de las comunidades circundantes a estas zonas se construyeron sobre rellenos constituidos por sedimentos, específicamente por limo.

Además, la existencia de acuíferos superficiales en estas zonas constituye un factor natural que podría afectar la capacidad portante de este tipo de suelos para futuros proyectos de ingeniería civil. Las características físicas del suelo y la fácil accesibilidad al sitio fueron factores que influyeron en el desarrollo de este trabajo. Un mapa de ubicación del sitio de estudio se presenta en la Figura 1, con coordenadas 328,908mE y 1,042,979mN.

2.2. Aspectos geológicos

A pesar de que la zona de estudio se ubica dentro de la Formación Almirante Lajas, la cual domina los sectores de media montaña y el litoral costero, sobre yace a formaciones sedimentarias Gatún Uscari, en complemento con algunos cuerpos intrusivos de la formación Guayabito sobre la cordillera esta zona costera, la zona se caracteriza por presentar aluviones, sedimentos no-consolidados, areniscas, corales, manglares, conglomerados, lutitas carbonosas, deposiciones tipo delta, propios de la Formación Las Lajas, del período Cuaternario (ver la Figura 1) además

de ser zona de influencia y depósito de material eruptivo reciente del cercano volcán Barú.

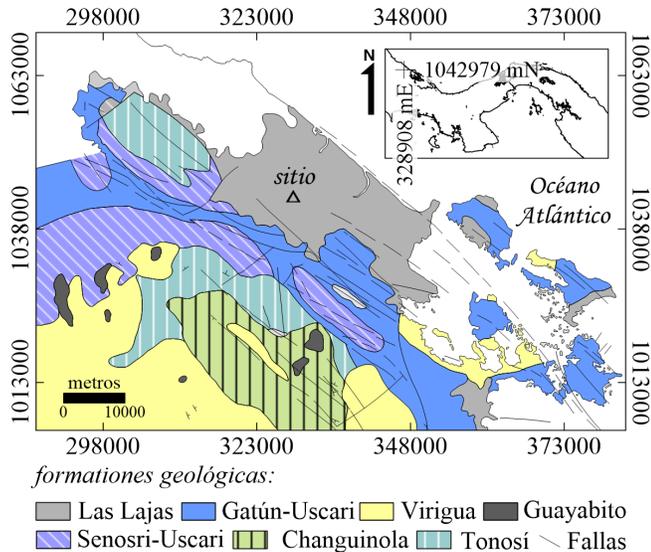


Figura 1. Ubicación geográfica del sector de Finca 30 en el mapa geológico y alrededores, provincia de Bocas del Toro.

Fuente: Dirección Nacional de Recursos Minerales [14].

Otro elemento importante en la geología es la presencia de grandes fallas regionales de corrimiento que afectan la superficie con una extensión Noroeste y buzamientos predominantes hacia el Noreste producto de las tensiones que ejerce la placa del Caribe en el desarrollo del grabben Centroamericano del cual forma parte.

2.3. Información estratigráfica del sitio

En la Figura 2(a) se presenta una imagen aérea de la zona bajo estudio con el perfil de 30m en donde se desarrollaron todas las pruebas geofísicas (dirección Noroeste-Sureste). Por su parte, la Figura 2(b) muestra la descripción estratigráfica en el centro del perfil establecido. Un conjunto de muestras fue tomado de esta perforación para su posterior análisis de laboratorio. Los resultados mostraron dos horizontes: el primero correspondiente a un limo elástico de plasticidad media, pH neutro y consistencia medianamente firme hasta una profundidad de 2.10m, seguido de un segundo horizonte compuesto por un limo gris oscuro, caracterizado por presentar un elevado contenido de humedad, baja plasticidad, pH neutro y consistencia medianamente firme. La perforación concluyó a la profundidad de 6m,

y durante la jornada geofísica el nivel freático se detectó a una profundidad de 1.80m.

Por otro lado, los ensayos de humedad natural del suelo presentan un incremento porcentual para las muestras obtenidas entre 0 y 0.6m (46.12%), para las muestras obtenidas entre 1.5 y 2.1m de profundidad, la humedad natural del suelo aumentó a 48.46%. Las muestras obtenidas entre las profundidades de 3.0 y 3.6m presentaron por su parte una disminución en el valor de este parámetro (45.41%) y finalmente, para el conjunto de muestras obtenidas entre 4.5 y 5.1m, la humedad natural reportada fue de 46.12%. La Figura 2(c) presenta un gráfico sobre este resultado.

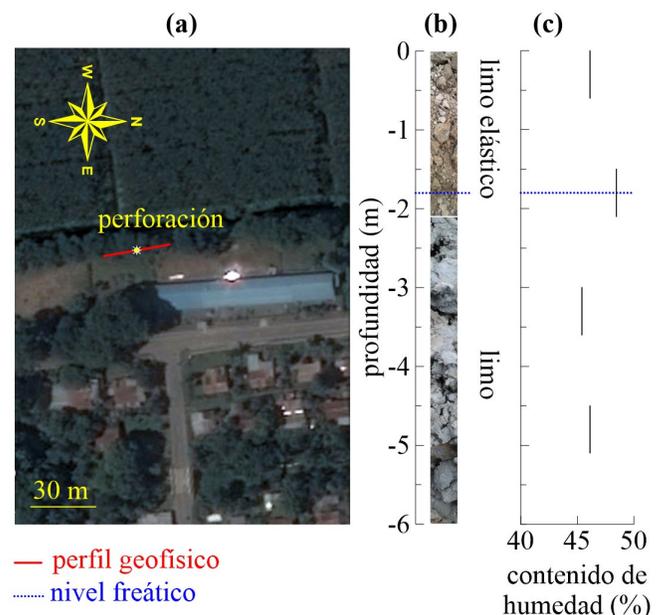


Figura 2. (a) Imagen aérea de la zona de interés y el perfil establecido, (b) detalle estratigráfico de la perforación desarrollada cercano al centro del perfil y (c) contenido natural de humedad de las muestras obtenidas en dicha perforación.

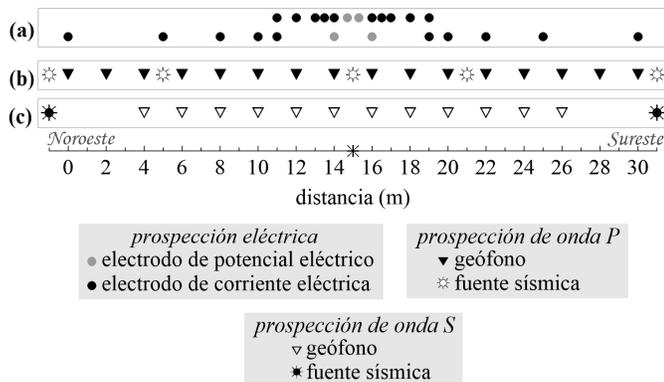
Fuente: Imagen aérea tomada de Google Earth.

2.4. Estrategia de adquisición

2.4.1. El sondeo eléctrico – inversión 1D

La configuración electródica tipo Schlumberger ha sido empleada en diversas investigaciones relacionadas con la caracterización estratigráfica y la búsqueda de fuentes de aguas subterráneas [14], [15], [16]. Para el sondeo eléctrico desarrollado en el punto central del perfil en el área de estudio, se empleó un prototipo de inyección de corriente alterna; los valores de resistividad eléctrica aparente se obtuvieron a través de la medición de los voltajes registrados, de la intensidad de la corriente

inyectada y la geometría del arreglo electródico empleado. Un total de 10 pares de datos (resistividad eléctrica aparente-distancia $AB/2$) fueron obtenidos para dos diferentes separaciones $MN/2$. La Figura 3(a) presenta la distribución de los electrodos de corriente y voltaje para la separación electródica $MN/2 = 0.3m$ (arriba) y $MN/2 = 1.0m$ (abajo), ubicándose el punto central del sondeo cercano a la perforación. Del total de datos medidos en campo, 9 fueron sometidos al proceso de inversión ya que para la distancia $AB/2 = 4m$, se registró el voltaje para las posiciones $MN/2 = 0.3m$ y $1.0m$.



Los datos fueron invertidos empleado el software IX1D de Interpex y cuyo código de inversión está basado en el método Ridge Regression [17], [18]; su estimador interpreta las curvas de resistividad eléctrica aparente para modelos de terreno horizontalmente estratificados, considerando una pequeña cantidad de eigenvalores contenidos en el esquema de inversión y compuestos por las matrices Jacobiana e identidad.

2.4.2. Prospección de onda P – refracción sísmica

Un total de 16 geófonos de 14Hz fueron separados 2m entre ellos obteniéndose una longitud total de perfil de 30m tal como lo muestra la Figura 3(b), en donde las posiciones del primer y último geófono fueron de 0 y 30m, respectivamente.

Estos geófonos se interconectaron a un sismógrafo tipo ES-3000 de Geometrics Inc. a través de un sistema multi-cable, los cuales fueron empleados también para los estudios de onda S; por su parte las ondas sísmicas fueron generadas a través de 5 golpes de un mazo de 20lb sobre

una placa metálica ubicada en un determinado punto a lo largo del perfil. El incremento en el número de golpes en un punto dado aumenta la razón señal/ruido; un total de 5 puntos de impacto fueron establecidos a lo largo del perfil tal como lo muestra la Figura 3(b).

El sistema fue configurado para: (a) una duración temporal de las trazas sísmicas de 250ms, (b) 50ms de pre-evento (delay) y (c) un intervalo de muestreo de 0.250ms. La Figura 4 ilustra las 16 trazas sísmicas obtenidas para cada uno de los 5 shot point establecidos en el perfil bajo estudio.

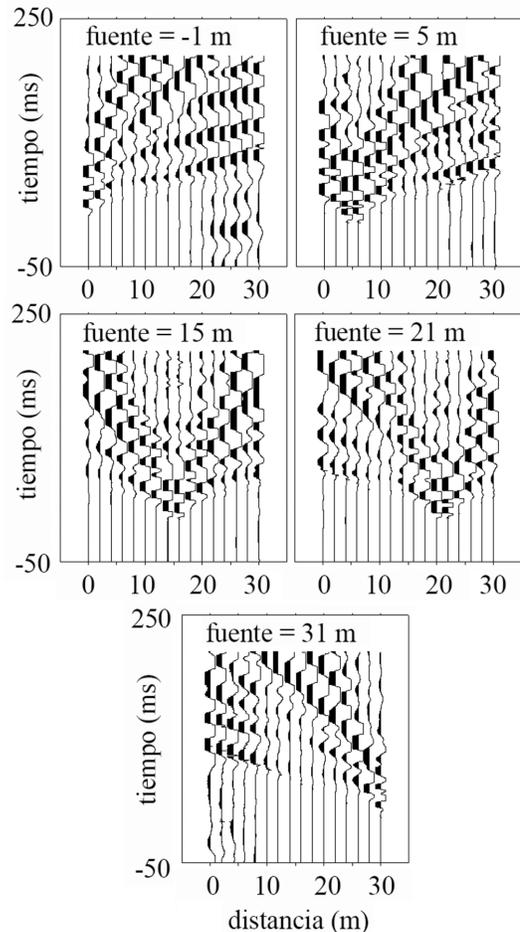


Figura 4. Sismogramas registrados por los geófonos de 14Hz y obtenidos para los 5 shot points o fuentes establecidas a lo largo del perfil.

La secuencia del procesamiento de estas señales de refracción sísmica consistió en la determinación del tiempo de llegada de las ondas P a cada geófono; para esto, se empleó el módulo Pickwin de SeisImager2D (Geometrics). Seguidamente se empleó el módulo

Plotrefa para definir las dromocronas y luego obtener un modelo 2D de terreno a través de un proceso de inversión basado en el método time-term inversión [19]. Este es un método simple de inversión de tiempos de trayecto de una onda sísmica, el cual fue desarrollado por [20].

2.4.3. Prospección de onda S – (Análisis Multicanal de Ondas Superficiales 1D o MASW-1D)

Sobre el mismo perfil, se utilizaron 12 geófonos de 4.5Hz los cuales se separaron 2m entre ellos, obteniéndose una longitud del arreglo de 22m; las posiciones del primer y último geófono fueron 4 y 26m, respectivamente. Un total de dos puntos de impacto se establecieron en los extremos de dicho perfil (-1 m y 31 m). La configuración del sistema consistió en establecer: (a) una extensión temporal de los registros de 1000ms, (b) un intervalo de muestreo de 0.5ms y (c) un total de 5 golpes en cada punto de impacto de forma análoga a la prueba precedente.

La Figura 3(c) presenta la distribución de los geófonos y puntos de impacto para el desarrollo de esta prueba MASW. La Figura 5 muestra las 12 trazas sísmicas obtenidas para cada uno de los puntos de impacto sobre el perfil dado. El análisis multi-canal de ondas superficiales se basa en el estudio de la propiedad de dispersión de las ondas Rayleigh en las trazas sísmicas obtenidas y de ahí, la posibilidad de determinar un perfil de velocidad de onda S en función de la profundidad.

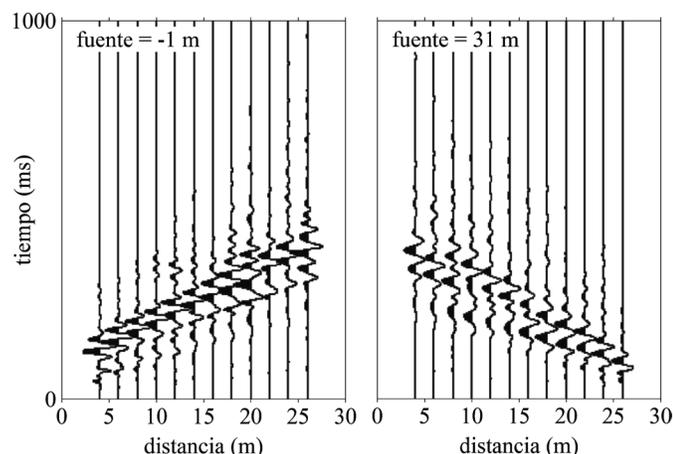


Figura 5. Sismogramas registrados por los geófonos de 4.5Hz y obtenidos para los 2 shot points o fuentes establecidas a lo largo del perfil.

Las ondas sísmicas de baja frecuencia pueden llegar a agitar la columna de suelo de mayor espesor cercana a la superficie, hecho que permite determinar la velocidad de

fase de las ondas Rayleigh a diferentes frecuencias, lo que conlleva a la generación de un espectro de velocidad de fase del cual se extrae una curva de dispersión.

Tomando en cuenta que el centro del arreglo de los geófonos ubicados a lo largo del perfil corresponderá a la posición del sondeo sísmico, se procedió con la extracción de la curva de dispersión normalizando la amplitud del espectro para cada frecuencia dada y para cada uno de los dos puntos de impacto establecidos; posteriormente, se apilaron los dos espectros de dispersión normalizados y se procedió en identificar los puntos de la curva correspondiente al modo fundamental. Este primer procesamiento se realizó a través del programa de código abierto Geopsy para pruebas de fuente activa (MASW-1D).

En este mismo punto, la selección de la frecuencia mínima en el espectro apilado depende tanto de la longitud máxima del arreglo de geófonos (L) como de la longitud de onda máxima. [21] y [22] recomiendan que esta longitud de onda máxima debe ser inferior a L debido al efecto de campo cercano y la sobreestimación del valor de la velocidad a baja frecuencia. En este estudio, la frecuencia mínima obtenida fue de 11.6Hz la cual se encuentra asociada con una longitud máxima de 10.6m. De acuerdo con [21] la profundidad de investigación corresponde a la mitad del valor de la longitud de onda máxima ($\lambda_{max}/2 = 5.3m$). Por otro lado, la frecuencia máxima depende del efecto aliasing o distorsiones que se presentan en el espectro de dispersión normalizado. Para este estudio, dicha frecuencia fue de 24.4Hz.

La inversión del conjunto de datos de velocidad de fase de las ondas Rayleigh vs la frecuencia se desarrolló empleando el algoritmo neighborhood el cual fue desarrollado por [23] y emplea los constructores geométricos o celdas de Voronoi para derivar la búsqueda en el espacio de los parámetros; dicho algoritmo fue adaptado por [24] y [25] a estudios subsuperficiales a través de la herramienta Dinver incorporado en Geopsy.

3. Resultados y Discusión

3.1. Resultado de la inversión eléctrica 1D

Para este primer ensayo geofísico, las observaciones o datos de campo (valores de resistividad eléctrica aparente medidos en campo) y la respuesta del modelo (valores de resistividad eléctrica aparente calculados) se presentan en el gráfico log-log de la Figura 6(a).

Como puede observarse en el gráfico bilogarámico, la respuesta del modelo se ajusta a los datos de campo al establecer un total de 2 capas; la resolución del problema inverso 1D dio por resultado el modelo unidimensional que se presenta en la Figura 6(b) en conjunto con los modelos equivalentes, obteniéndose un error RMS de 2.73%. La primera capa se encuentra caracterizada por presentar un valor de resistividad eléctrica calculada igual a 37.9ohm.m y un espesor de 1.7m, mientras que el segundo horizonte presenta una resistividad más baja (10.7ohm.m); como puede observarse, el contraste existente entre ambos horizontes se aproxima al nivel freático detectado durante la jornada de trabajo (1.8m).

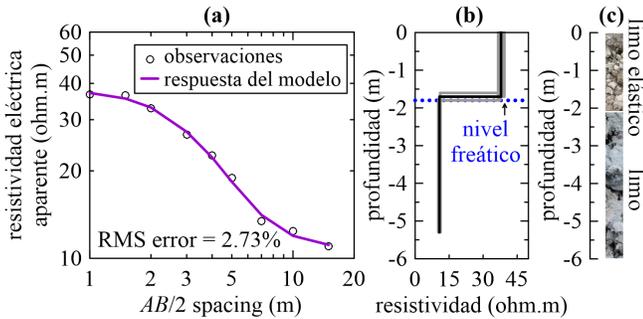


Figura 6. (a) Gráfico bilogarámico de las observaciones o datos de campo, respuesta del modelo o datos de campo sintéticos versus el espaciamento medio (AB/2) entre los electrodos de corriente eléctrica, (b) modelo de terreno obtenido posterior a la resolución del problema inverso (línea negra continua) con 6 modelos equivalentes (líneas continuas en tono gris), e (c) información estratigráfica del sitio de interés.

3.2. Resultado de prospección de onda P

La Figura 7(a) muestra las curvas de tiempos de llegada en función de la distancia para todos los 5 puntos de impacto establecidos a lo largo del perfil, mientras que la Figura 7(b) muestra el modelo de capas del terreno obtenido mediante la resolución del problema inverso. El error RMS en la inversión de la matriz obtenido para esta prueba fue de 1.82ms.

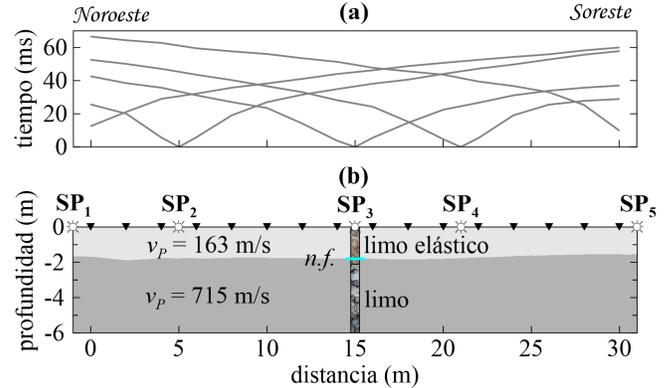


Figura 7. (a) Curvas de tiempo de arribo de las ondas refractas y (b) modelo 2D de terreno obtenido con el método de inversión del tiempo de recorrido, n.f. corresponde al nivel freático.

Un análisis de los resultados obtenidos en la Figura 7(a) sugieren la presencia de dos capas: un horizonte superficial de un espesor que varía entre 1.9 y 1.5m, y con una velocidad de onda P calculada de 163m/s, seguido de un horizonte caracterizado por presentar un valor de velocidad de onda P calculado de 715m/s. En la posición 15m a lo largo del perfil, muy cercano a la perforación, el horizonte superficial presentó un espesor de 1.8m (ver Figura 7(b)).

3.3. Resultado de prospección de onda S

El proceso de apilamiento de los espectros de dispersión normalizados obtenidos a partir de los puntos de impactos desarrollados en las posiciones -1m y 31m (Figura 8(a)), se presenta en la Figura 8(b). La inversión 1D de la curva de dispersión extraída de la Figura 8(b) se ilustra a través de la línea negra continua de la Figura 8(c) la cual representa el menor valor de discrepancia (0.0118) de los 2550 modelos calculados. Dicho modelo presenta 2 horizontes: el superficial de 3.15m de espesor y de 85m/s de velocidad de onda S calculada, seguido por un horizonte de mayor velocidad (177m/s). La profundidad de investigación (DOI) obtenida en esta prueba fue de 5.3m, tal como se mencionó con anterioridad.

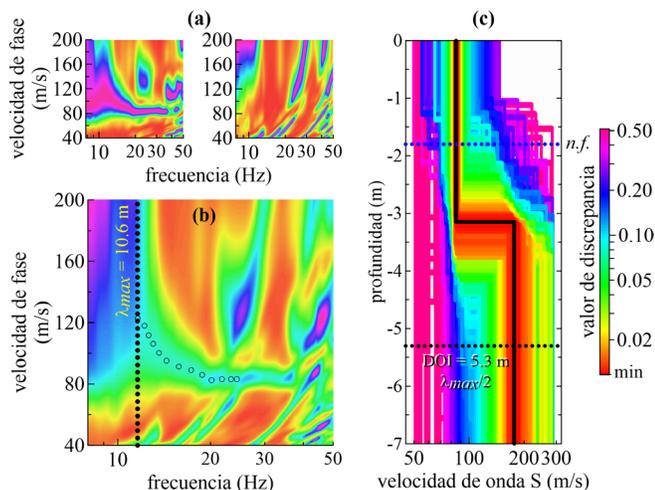


Figura 8. (a) Espectros de dispersión normalizados obtenidos en los puntos de impacto establecidos en las posiciones -1.0m y 31.0m. (b) Espectro y curva de dispersión obtenidos a partir del apilamiento de los dos puntos de impacto, y (c) resultado de la inversión 1D de los datos de velocidad de fase vs frecuencia extraídos de la Figura 8(a) empleando el algoritmo neighborhood implementado por [24] en el programa Geopsy. DOI corresponde a la profundidad de investigación y *n.f.*, el nivel freático.

Con los modelos 1D de velocidad de las ondas P y S en la posición 15m, se procedió en calcular los valores de la razón de Poisson en función de la profundidad para un DOI de 5.3m. La Figura 9(a) presenta ambos modelos 1D desplegados en un mismo gráfico.

Para la prospección de onda P, el primer horizonte de velocidad calculada de 163m/s se encuentra asociado al limo elástico de plasticidad media identificado en la perforación, mientras que el segundo horizonte con velocidad de 715m/s se asocia con un limo de plasticidad baja. Como se mencionó antes, el nivel freático se correlaciona bien con el resultado de esta prueba; a partir de 1.80m de profundidad, la velocidad de onda P se mantiene constante hasta los 5.3m.

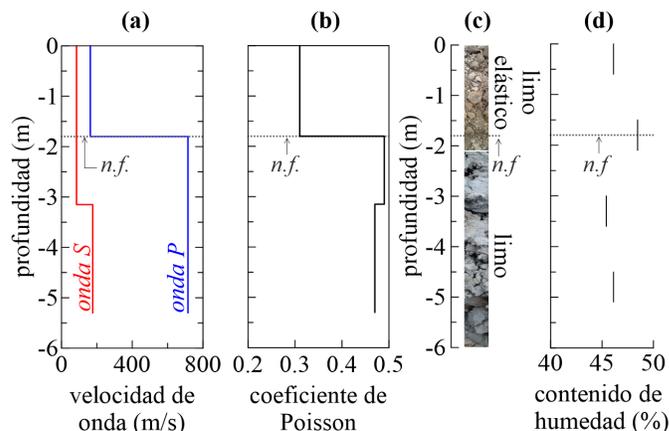


Figura 9. (a) Modelos 1D de velocidad de onda P extraído del perfil de refracción sísmica de la Figura 7(b) y de velocidad de onda S obtenido en la Figura 8(b); (b) razón de Poisson computada a partir de los modelos 1D de onda P y S; (c) información estratigráfica del sitio y (d) contenido natural de agua; *n.f.* corresponde al nivel freático.

Por su parte, el resultado obtenido en el análisis multicanal de ondas superficiales (1D) no presenta una correlación muy significativa entre el límite de los dos horizontes identificados en esta prueba (3.15m de profundidad) y el nivel freático (1.80m); sin embargo, el primer horizonte de velocidad de onda S de 85m/s se asocia con el limo elástico de plasticidad media, y el segundo de 177m/s, al limo de plasticidad baja. Para el coeficiente de Poisson (Figura 9(b)) se presentan 3 horizontes: con un valor de 0.31 y un espesor de 1.8m para el horizonte superficial; este es un típico valor que de acuerdo con [26] y [27] corresponde a sedimentos no consolidados y no saturados, el cual es el caso del limo elástico de plasticidad media identificada en la perforación.

Entre 1.8m y 3.15m de profundidad se presenta un segundo horizonte con un valor del coeficiente de Poisson igual a 0.49, el cual es típico de los sedimentos saturados ([28], [29], [30], [31]) y corresponde al limo de plasticidad baja. El límite entre estos dos horizontes se asocia con el nivel freático identificado en la perforación. El tercer horizonte posee un valor de coeficiente de Poisson cercano al identificado en el horizonte precedente (0.47), por lo que se asocia al mismo tipo de limo de baja plasticidad, pero con un menor nivel de saturación.

4. Conclusiones

En la actualidad, los métodos sísmicos no han sido extensamente utilizados en estudios hidrogeológicos en

comparación con los métodos geoelectrónicos y electromagnéticos; como método de verificación de los límites de saturación del suelo, el sondeo eléctrico mostró una buena correlación entre el nivel freático reportado y el límite estratigráfico de los limos identificados en la perforación. Por su parte, la combinación de perfiles de velocidad de onda P y S a través del cálculo de la razón de Poisson, podría jugar un rol importante en la detección de los niveles freáticos en los suelos sedimentarios, y no solamente a nivel de detección de los límites de los diferentes estratos sino también a la extensión del tamaño ya que los estratos saturados se caracterizan por presentar valores cercanos al límite de 0.50. En el área de interés, el análisis de refracción sísmica presentó una buena correlación con: el resultado del sondeo eléctrico, el nivel freático y una diferencia aceptable de 30cm con el límite estratigráfico entre ambos limos; sin embargo, el modelo 1D obtenido a través del análisis multicanal de ondas superficiales presentó discrepancias con el resultado del sondeo eléctrico, la lectura del nivel freático y con el límite estratigráfico. El cálculo del coeficiente de Poisson obtenido en el área de estudio permitió detectar el nivel freático a la profundidad reportada y por la magnitud (0.49), y manteniéndose casi constante (con una leve diferencia de 0.02) hasta 3.15m y luego hasta el máximo de profundidad alcanzado en este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad Tecnológica de Panamá y a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) a través del SNI, por todo el apoyo brindado para el desarrollo de este proyecto.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

A.M.: medición de parámetros geofísicos en campo, análisis e interpretación de los datos geofísicos, redacción del artículo. O.C.: medición de parámetros geofísicos en campo, análisis de las muestras de suelo obtenidas en la perforación. E.S.: coordinación de la perforación y el análisis de las muestras obtenidas en la

misma. J.L.G.: redacción parcial y revisión del manuscrito. A.R.: análisis del contexto geológico del área de estudio. C.H.: configuración y análisis de los datos de onda S. J.T.: estudio del contexto geológico y tectónico de la zona de interés y revisión del artículo.

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] S.S. Hubbard y Y. Rubin. "Introduction to Hydrogeophysics", en: Hydrogeophysics (Eds. Y. Rubin y S.S. Hubbard), Holanda: Springer, pp. 3-22. 2005
- [2] S.S. Hubbard y N. Linde. "Hydrogeophysics". *Treatise on Water Science*, vol. 2, pp. 401-434. 2011
- [3] A. Mojica A. "Geoelectrical Sounding and Imaging over the Central Zone of Panama", en: Geophysics (Ed. A. Okiwelu), Londres: IntechOpen, pp. 136-147. 2018
- [4] A. Mojica, I. Díaz, C.A. Ho, F. Ogden, R. Pinzón, J. Fábrega, D. Vega y J. Hendrickx. "Study of seasonal rainfall infiltration via time – lapse surface electrical resistivity tomography. A case study of Gamboa area, Panama Canal Watershed", *Air, Soil and Water Research Journal*, vol. 6, pp. 131-139. 2013
- [5] F. Ogden, A. Mojica, E. Kempema, J. Briceño y J. Regina. "Diagnosing Hydrologic Flow Paths in Forest and Pasture Land Uses within the Panama Canal Watershed Using Simulated Rainfall and Electrical Resistivity Tomography", en AGU Fall Meeting Suppl., San Francisco, California, 2014
- [6] E. Kempema, A. Mojica, G. Litt, F. Ogden y A. Carey, A. "Effect of forest age on rainwater infiltration in the lowlands humid tropics", en AGU Fall Meeting Suppl., San Francisco, California, 2015
- [7] M. Castrellón, J. Fábrega, L. Foglia, A. Mojica, A. Ruíz y S. Saavedra. "Groundwater model of a fractured rock system as a tool for groundwater management: The Estibaná Sub-Catchment, Azuero Peninsula, Panama", en E-proceedings of the 38th IAHR World Congress, Panama, 2019
- [8] G. Litt, F. Ogden, A. Mojica, E. Kempema, C. Gardner, J. Regina, J. Bruce, J. Harrison, J. Hendrickx, M. Bretfeld, Y. Cheng, R. Stallard, J. Hall y W. Lyons. "Land Cover Effects on Soil Infiltration Capacity Measured Using Plot Scale Rainfall Simulation in Steep Tropical Lowlands of Central Panama". *Hydrological Processes*, vol. 34, no. 4, pp. 878-897, 2020.
- [9] F. Rejiba, A. Mojica, M. Schmutz, A. Ruíz, M. Castrellón, J. Ladrón De Guevara, S. Saavedra, J. Fábrega, C. Finco, C. Schamper, L.H. Cavalcante y M. Llubes. "Geophysical characterization of near-surface formations in the La Villa River catchment (Los Santos, Panama)", en Conference Proceedings, NSG2021 1st Conference on Hydrogeophysics, Bordeaux, Francia, 2021, pp. 1-5
- [10] A. Mojica, B. Duarte, F. Vergara, M. Pinto, R. Pinzón, J. Pérez, M. Castrellón, C.A. Ho y M. Gómez. "Time-lapse electrical resistivity tomography for assessment of seasonal

- moisture variations in a tropical regolith". *Hydrological Research Letters*, vol. 16, no. 1, pp. 18-24, 2022
- [11] S. Pasquet, L. Bodet, A. Dhemaied, A. Mouhri, Q. Vitale, F. Rejiba, N. Flipo y R. Guérin. "Detecting different water table levels in a shallow aquifer with combined P-, surface and SH-wave surveys: Insights from V_p/V_s or Poisson's ratios". *Journal of Applied Geophysics*, vol. 113, pp. 38-50, 2015
- [12] S. Pasquet, L. Bodet, L. Longuevergne, A. Dhemaied, C. Camerlynck, F. Rejiba y R. Guérin. "2D characterization of near-surface V_p/V_s : surface-wave dispersion inversion versus refraction tomography". *Near Surface Geophysics*, vol. 13, pp. 315-331, 2015
- [13] S. Pasquet y L. Bodet. "SWIP: An integrated workflow for surface-wave dispersion inversion and profiling". *Geophysics*, vol. 82, no. 6, pp. WB47-WB61, 2017
- [14] Atlas Nacional de la República de Panamá. Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia. Colombia: Impresiones Carpal, pp. 36-37, 2016.
- [15] M. Karous y T.K. Pernu. "Combined sounding-profiling resistivity measurements with the three-electrode arrays". *Geophysical Prospecting*, vol. 33, no. 3, pp. 447-459, 1985
- [16] M.C. Stadelhofen. *Applications de la géophysique aux recherches d'eau*. Francia: Technique et Documentation-Lavoisier, 1991
- [17] Y.L. Ekinici y A. Demirci. "A Damped Least-Squares Inversion Program for the Interpretation of Schlumberger Sounding Curves". *Journal of Applied Sciences*, vol. 8, no. 22, pp. 4070-4078, 2008
- [18] D.W. Marquardt. "Generalized Inverses, Ridge Regression, Biased Linear Estimation, and Nonlinear Estimation". *Technometrics*, vol. 12, no. 3, pp. 519-612, 1970
- [19] J.R. Inman. "Resistivity inversion with Ridge Regression". *Geophysics*, vol. 40, no. 5, pp. 798-817, 1975
- [20] T. Iwasaki. "Extended time-term method for identifying lateral structural variations from seismic refraction data". *Earth Planets Space*, vol. 54, pp. 663-677, 2002
- [21] A. Scheidegger y P.L. Willmore. "The use of a least square method for the interpretation of data from seismic surveys". *Geophysics*, vol. 22, no. 1, pp. 9-21, 1957
- [22] A. O'Neill. "Full-waveform reflectivity for modelling, inversion and appraisal of seismic surface wave dispersion in shallow site investigation", PhD thesis, The University of Western Australia, 2003
- [23] D. Zywicki y G. Rix. "Mitigation of near-field effects for seismic Surface wave velocity estimation with cylindrical beamformers". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 131, no. 8, pp. 970-977, 2005
- [24] M. Sambridge. "Geophysical inversion with a neighborhood algorithm-I. Searching a parameter space". *Geophysical Journal International*, vol. 138, no. 2, pp. 479-494, 1999
- [25] M. Wathelet, D. Jongmans y M. Ohrnberger. "Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements". *Near Surface Geophysics*, vol. 2, no. 4, pp. 211-221, 2004
- [26] M. Wathelet M. "An improved neighborhood algorithm: parameter conditions and dynamic scaling". *Geophysical Research Letters*, vol. 35, no. 9, pp. L09301, 2008
- [27] K.H. Stokoe y R.D. Woods. "In situ shear wave velocity by cross-hole method". *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*, vol. 98, pp. 443-460, 1972
- [28] D. Tiab y E.C. Donaldson. *Petrophysics. Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. Houston: Gulf Publishing, 1996
- [29] H. Stuempel S. Kaehler, R. Meissner y B. Milkereit. "The use of seismic shear waves and compressional waves for lithological problems of shallow sediments". *Geophysical Prospecting*, vol. 32, no. 4, pp. 662-675., 1984
- [30] R. Meissner, H. Stuempel y F. Theilen. "Shear wave studies in shallow sediments. Seismic shear waves", en *Handbook of geophysical exploration. Applications*, (Eds. K. Helbig y S. Treiter), London: Geophysical Press, pp. 225-253, 1985
- [31] H.S. Salem. "Poisson's ratio and the porosity of surface soils and shallow sediments, determined from seismic compressional and shear wave velocities". *Géotechnique*, vol. 50, no. 4, pp. 461-463, 2000
- [32] O. Uyanik. "The porosity of saturated shallow sediments from seismic compressional and shear wave velocities". *Journal of Applied Geophysics*, vol. 73, no. 1, pp. 16-24, 2011.



Diseño y prueba de un equipo de espectroscopia de resonancia acústica en líquidos y sus potenciales usos

Design and testing of acoustic resonance spectroscopy equipment and its potential uses

Juan Carlos Aranda ¹ , Eleicer Ching-Prado ^{1*} 

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ciencias y Tecnología, Laboratorio Pierre-Marie Curie, Panamá

juan.aranda1@utp.ac.pa; eleicer.ching@utp.ac.pa

Fecha de recepción: 16 de mayo de 2022; Fecha de aprobación: 22 de junio de 2022.

***Autor de correspondencia:** Eleicer Ching Prado (eleicer.ching@utp.ac.pa)

RESUMEN. Para las industrias es de mucha importancia conocer las características tanto de la materia prima como la de sus productos terminados, por eso es necesario contar con técnicas que les faciliten este análisis en un tiempo rápido, de manera no invasiva y confiable. Por ello, en este trabajo estudiamos la aplicación de un método de espectroscopia acústica sobre muestras líquidas, las cuales se les hace pasar una energía de excitación producidas por un barrido de ondas sonoras que van desde los 20Hz hasta los 20KHz, y luego la respuesta del sistema a dicha excitación es captada y procesada para su posterior análisis. La respuesta se muestra gráficamente en un espectro de resonancia, donde las bandas formadas brindan información sobre las características de la muestra que se está analizando. Para llevar a cabo dicho experimento, se construyó un equipo el cual cuenta con materiales adecuados para la acústica, y diseñado de tal forma que siempre tenga las mismas condiciones en cada prueba que se haga. Se usó un software para evaluar la respuesta acústica del sistema. El equipo se probó con distintas sustancias como agua, Alcohol al 70% y 95% para poder ver diferencias entre sustancias, obteniendo muy buenos resultados y consistencia en los mismos. Se puede ver las diferencias en los corrimientos de las bandas de resonancia entre el agua, el alcohol al 70%, y el alcohol al 95%. Estos resultados nos comprueban que es posible aplicar esta técnica para evaluar las propiedades de alimentos líquidos.

Palabras clave. *Bandas de resonancia, espectro de resonancia, propiedades fisicoquímicas.*

ABSTRACT. In industries it is very important to know the characteristics of both the raw material and the finished products, which is why it is necessary to have techniques that facilitate this analysis in a short time, in a non-invasive and reliable way. For this reason, in this work we study the application of a method of acoustic spectroscopy on liquid samples, which are made to pass an excitation energy produced by a sweep of sound waves ranging from 20Hz to 20KHz, and then the response of the system this excitation is captured and processed for later analysis. The response is displayed graphically in a resonance spectrum, in which information about the characteristics of the sample we are analyzing can be obtained by seeing the resonance bands formed. To carry out this experiment, an equipment was built which has adequate materials for acoustics and designed in such a way that it always has the same conditions in each test that is done. A free software was used to evaluate the response of the system. The equipment was tested with different substances, such as water, 70% and 95% alcohol to be able to see differences between substances, obtaining very good results and consistency in them. You can see the differences in the shifts of the resonance bands between water, 70% alcohol, and 95% alcohol. These results prove that it is possible to apply this technique to evaluate the properties of liquids, and especially those in the food field.

Keywords. *Resonance bands, resonance spectra, physicochemical properties.*

1. Introducción

Las técnicas de análisis no invasivas para materiales vienen desarrollándose desde hace décadas, ya que una técnica no invasiva tiene la ventaja de no destruir la muestra y puede ser utilizada in situ en una línea de

proceso. Con esto en mente, buscamos desarrollar un equipo basado en la técnica de resonancia acústica, el cual utiliza las ondas sonoras para evaluar las características de un material líquido, el cual puede ser

un alimento, un aceite, una sustancia química, entre muchas otras.

Esta técnica se viene utilizando desde los años 80 con diversos trabajos como el de Sinha, que desarrolla la tecnología de espectroscopia de resonancia acústica (ARS, por sus siglas en inglés) para evaluar las características de diversos armamentos utilizados por el ejército de los Estados Unidos, incluyendo aquellos que contengan sustancias peligrosas [1]. Posteriormente, se logra desarrollar un prototipo de equipo ARS portátil para detectar armas nucleares en los campos de batalla.

La técnica ARS se ha aplicado para investigar los cambios de composición de un gas dentro de un cilindro con plutonio [2]. También ha sido aplicado en las investigaciones de materiales, como el estudio de las vibraciones de barras sólidas de aluminio utilizando transductores de tipo magnético [3], [4]. En el campo de la medicina y la industria alimentaria, se han realizado investigaciones con la técnica ARS para productos en forma de cremas y pastas [5]. Igualmente se ha utilizado esta técnica para evaluar un producto mediante el impacto con una placa acoplada con un detector la cual recoge la vibración que se produce al momento de la colisión y evaluar su respuesta [6], [7]. Más recientemente, se han utilizado métodos acústicos para evaluar la textura de alimentos como las frutas, para determinar su estado de maduración [8]. También se realizaron estudios de resonancia acústica para evaluar la ruptura del cascarón de los huevos de gallina, en una línea de proceso, donde se utilizó, en la mayoría de los casos, un impacto para generar la excitación y un micrófono para recolectar la señal [9-14]. Otro estudio importante que se ha realizado es el uso del ARS de banda ancha para analizar la composición de las materias primas en polvo [15].

Adicionales aplicaciones de esta técnica involucran el estudio sobre la caracterización de las sales ya que algunas pueden contener más impurezas que otras y mediante la técnica de ARS de banda ancha se pudieron estudiar sus características [16]. También se ha podido estudiar el sonido que se produce al masticar los alimentos y evaluar si es crujiente [17]. Así como también la determinación de micotoxinas, como la vomitoxina, que se produce en los granos de trigo [18]. De igual forma, en productos agrícolas en los cuáles se evalúan sus propiedades acústicas para determinar sus

características que marquen diferencias [19]. Tal es el caso de frutas como la manzana donde se han realizado pruebas para evaluar su calidad [20].

Las características de las vibraciones acústicas de los productos, pueden ser medidas con métodos acústicos ya que la información interna del mismo puede ser obtenida por la interacción de la onda acústica con la muestra analizada. Los parámetros de la vibración acústica incluyen; la frecuencia natural, velocidad de propagación, impedancia acústica, coeficiente de atenuación entre otros. Las diferencias mecánicas de la estructura interna resultan en diferentes características de las vibraciones acústicas [21]. Si se disolviera una sustancia en polvo en un solvente líquido como el agua, se podrían observar el espectro acústico generado debido a los cambios de frecuencia del sonido que viaje en el medio de la disolución [22].

Las ondas de las vibraciones acústicas incluyen fenómenos de reflexión, dispersión, transmisión y absorción, cuando inciden en un producto o muestra, la manera en que se transmiten depende de las características de estos y están directamente relacionados con sus propiedades mecánicas y estructurales, como señalado anteriormente. En particular, la respuesta de las vibraciones acústicas depende de su módulo de elasticidad, radio de Poisson, masa, forma, y densidad [23], [24].

Las técnicas que utilizan vibraciones acústicas pueden clasificarse en función de los tipos de sensores que puedan ser utilizados para la medición de estas. Existen sensores de contacto los cuáles están tocando la superficie de la muestra, algunos de estos necesitan amplificadores de señal o son de tipo piezoeléctrico. También hay sensores que no necesitan un contacto directo con la muestra para realizar la medición como el vibrómetro de láser Doppler, siendo este último una técnica óptica. Los micrófonos han sido ampliamente utilizados para realizar estos tipos de estudios [25-28].

El fundamento de la técnica se basa en que todo objeto físico, ya sea sólido, hueco o esté lleno de fluidos, tienen muchos modos de vibración, denominados como los modos naturales de resonancia. Ellos son obtenidos en base a la forma del objeto, tamaño y propiedades físicas como el módulo de elasticidad, velocidad del sonido y densidad. Si el objeto es mecánicamente excitado por

frecuencias correspondientes a sus modos de vibración naturales, el efecto de resonancia puede ser observado con pequeñas energías de excitación y producen grandes amplitudes en las vibraciones del objeto. Para objetos llenos de un material, la resonancia natural es modificada por las propiedades físicas del material que llena el objeto. En consecuencia, el espectro de resonancia del objeto más su contenido posee información relevante sobre las propiedades del material contenido en su interior. El espectro de resonancia es obtenido por una continua excitación del objeto mediante un barrido de frecuencias y una medición en su respuesta, dando como resultado una firma acústica del objeto con su contenido. La medición puede ser de contacto directo con transductores, típicamente se emplean barridos entre 3KHz y 30 KHz en un tiempo menor a 60 segundos.[2]

Para desarrollar el experimento se escogió trabajar con una geometría cilíndrica para el vaso porta muestra, ya que la teoría de las vibraciones en las carcasas cilíndricas está muy desarrollada y se presentan diversos modelos matemáticos, los cuales permiten encontrar los modos de resonancia de estos sistemas, ya sea lleno en un material sólido o líquido, y para sistemas completamente vacíos. Para este proyecto se escogió el modelo matemático de Berry y Reissner [29], el cual permite encontrar los modos de resonancia del sistema.

$$(m_s + m_l)4\pi^2 f_{mn} = \frac{D}{a^4} (\lambda_m^2 + n^2)^2 + \frac{Eh}{a^2} \frac{\lambda_m^4}{(\lambda_m^2 + n^2)^2} \quad (1)$$

Siendo;

$$\lambda m = \frac{m\pi a}{L} \quad (2)$$

$$D = \frac{L E h^2}{12(1 - \nu^2)} \quad (3)$$

Donde f_{mn} es la frecuencia calculada, m_s es la masa por unidad de área, m_l es la masa aparente del líquido, h es el espesor de la pared de la carcasa, L es la altura de la carcasa, λ_m es el número de onda axial, D es el coeficiente de rigidez de flexión, E es el módulo de Young, ν es el radio de Poisson, m es el coeficiente por variar asociado con el modo longitudinal, y n es el otro coeficiente por variar asociado con el modo circunferencial de la carcasa.

En el presente proyecto, se construyó un equipo para hacer un barrido de frecuencias sobre una muestra líquida, el cual se encuentra en un contenedor de forma cilíndrica. Al realizar el barrido de sonido en la muestra, la respuesta acústica es detectada por un transductor y enviada a una computadora. Mediante un software para el análisis de sonido se obtiene un espectro de frecuencias, en donde se puede observar los modos de resonancia característicos del sistema, el cual incluye el vaso porta muestra y el líquido que lo contiene. Pudimos observar diferencia entre una misma sustancia, pero con diferentes concentraciones, esto viene siendo muy útil como herramienta de análisis para industrias como la de bebidas, alcoholes, aceites, entre otras.

El presente artículo está estructurado de la siguiente manera: La sección 2 describe el diseño y construcción del equipo, la sección 3 describe las pruebas y resultados, la sección 4 incluye análisis y discusión, siendo la sección 5 la conclusión.

2. Materiales y métodos

Para el diseño del equipo se tomaron las siguientes consideraciones: el equipo debe ser de un material liviano para poder transportarse fácilmente por el cual se seleccionó un material conglomerado MUF, pero además debe considerarse un alto grado de aislamiento para que los sonidos provenientes del ambiente no afecten el análisis realizado sobre la muestra, para lograr esto se colocó dentro del equipo una espuma de poliuretano. Se tomó en cuenta la posición y calibración del sensor y la fuente sonora, como el micrófono de tipo condensador y un audífono pequeño de tipo electrodinámico, ya que estos siempre deben estar a un mismo nivel y frente a frente. Además, se tomó en cuenta una estructura fija que sirviera como guía al vaso porta muestra la cual se hizo con teflón, ya que es importante que siempre quede en una misma posición [30], [31].

También se consideró un riel guía para fijar en el lugar indicado al sensor y al emisor con la muestra. Por último, se instalaron elementos de control para el movimiento del riel, este consta de un motor de corriente directa de 12V y un circuito que con 3 interruptores para controlar la dirección del movimiento del riel y la fijación de los sensores en la posición adecuada.

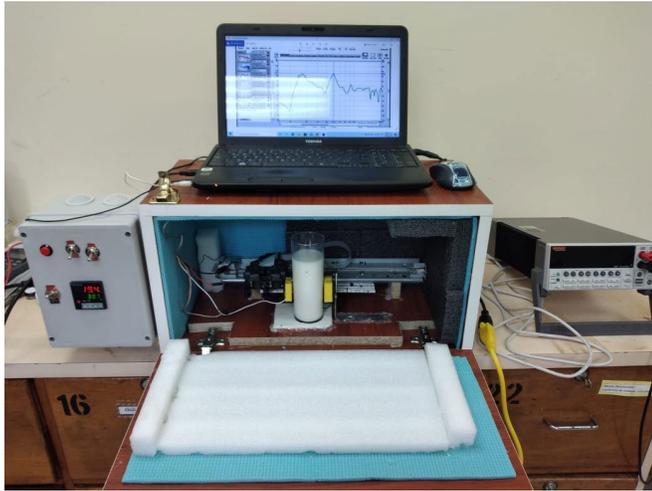


Figura 1. Equipo de resonancia acústico construido.

En la Figura 1 se puede ver el equipo construido con una muestra de leche, donde se observa a la izquierda de la imagen el micrófono de tipo condensador electreto el cual es una variante de micrófono electrostático, además este suele utilizar una lámina de plástico polarizado por lo cual no requiere alimentación. A la derecha se encuentra la fuente emisora, un audífono plano sin aislante de sonido incorporado. El vaso se encuentra centrado y ajustado con el riel en una guía hecha de teflón. Todo esto asegura que en cada medición se tenga las mismas condiciones que garantice la repetibilidad de un evento. Se tiene un sensor de temperatura tipo K, conectado a un controlador de tipo PID que sirve como indicador de temperatura.

El equipo funciona de la siguiente manera: al colocar el vaso con la muestra se procede a fijarlo en una posición determinada, posteriormente se ajustan el emisor y el detector de sonido al vaso mediante el controlador del riel de posición. Finalmente, se cierra la puerta de la cámara y se procede a utilizar el software de análisis, el cual genera un barrido sonido desde una frecuencia que va desde los 20 Hz hasta los 20KHz. El sonido pasa por la muestra y es recogido en el micrófono de tipo condensador el cual está conectado a la computadora a través de un cable Jack 3.5 mm hacia la tarjeta de sonido de esta y recogido por el software para generar el espectro con las bandas de resonancias y los mínimos de la muestra. Es decir, los datos de las vibraciones acústica se recogen en forma de pulsos en función del tiempo y

mediante una transformada de Fourier nos entrega la señal, en decibeles, en función de la frecuencia. Esto nos forma el espectro el cual analizamos.

El Software utilizado fue REW-Room EQ Wizard Room Acoustics versión V5.20.4, el cual es un programa de acuerdo de licencia de usuario final (EULA por sus siglas en inglés) muy usado para realizar análisis acústico en estudios de grabación y salas de eventos, los que requieren algunos parámetros de acústica especiales.

3. Resultados

3.1. Prueba de la acústica de la cámara del equipo

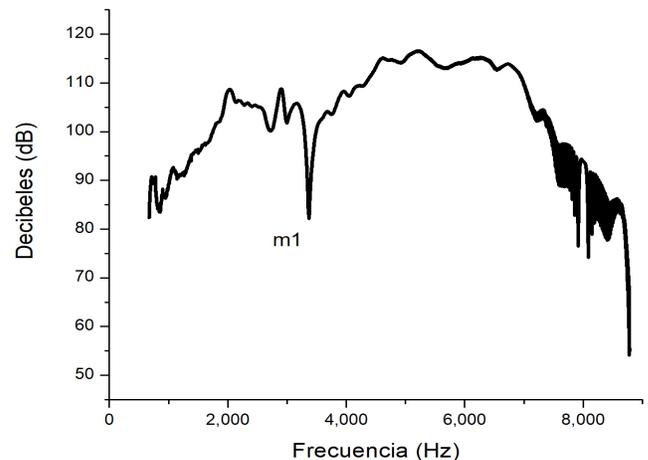


Figura 2. Espectro del equipo acústico sin el vaso.

Con la finalidad de evaluar la respuesta acústica de la cámara, se procedió a un barrido de sonido del sistema sin vaso porta muestra. En la Figura 2 se presenta el espectro, el cual nos muestra que solo se refleja un mínimo a una frecuencia promedio de 3,361Hz. Esta prueba se realizó tres veces en diferentes tiempos, mostrando una buena repetibilidad. No se observa en el espectro bandas de resonancia bien definidas.

3.2. Prueba del vaso vacío

Es muy importante conocer el comportamiento acústico del recipiente que contiene la muestra a analizar. Para el caso estudiado, el vaso de vidrio que se escogió es totalmente cilíndrico sin ningún tipo de relieve que pueda afectar los modos normales de vibración que

presenta el mismo. Por lo consiguiente se procedió a realizar la prueba acústica para formar el siguiente espectro característico del vaso.

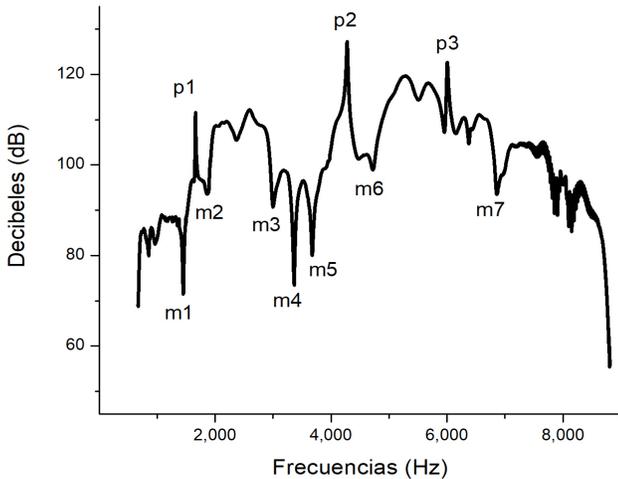


Figura 3. Espectro del vaso de vidrio vacío.

En la Figura 3, podemos observar el espectro acústico del vaso vacío con al menos tres (3) bandas de resonancia bien definidas (p1, p2 y p3) al igual que siete (7) mínimos. La Tabla 1 presenta las frecuencias de resonancias para las tres (3) pruebas realizadas. Una buena repetibilidad es observada para las bandas de resonancia y los mínimos, con una desviación casi inexistente para el vaso de vidrio de 250ml elegido para este experimento.

Tabla 1. Bandas de resonancia del espectro del vaso vacío

	Hz	Hz	Hz
Bandas	p1	p2	p3
Prueba r1	1,664	4,275	6,000
Prueba r2	1,664	4,275	6,000
Prueba r3	1,663	4,275	6,000
Promedio	1,664	4,275	6,000
Desviación	0.71	0	0

3.3. Prueba con el vaso de vidrio lleno de agua

Se realizaron tres pruebas diferentes con un mismo volumen de agua de 200ml medidos con una probeta graduada, con el objetivo de obtener el grado repetibilidad en los espectros. A continuación,

mostramos los resultados obtenidos en el siguiente espectro promedio.

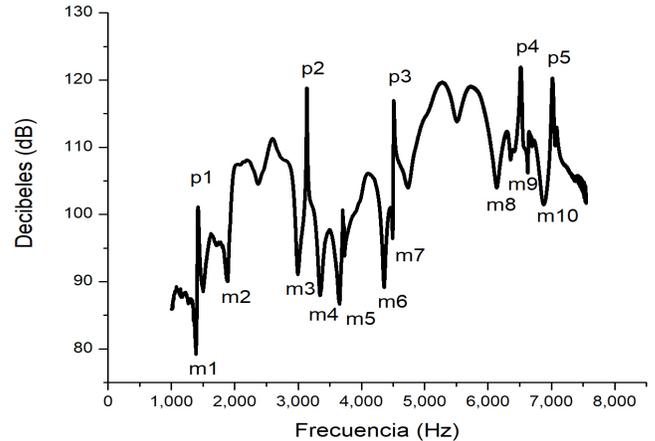


Figura 4. Espectro del vaso de vidrio lleno de agua.

En la figura 4, se muestra espectro acústico el cual tiene cinco (5) bandas de resonancia muy visibles (p1, p2, p3, p4 y p5) y diez (10) mínimos. En la Tabla 2 se pueden ver las frecuencias de resonancia obtenida en los tres (3) eventos con una muy buena repetibilidad y poca desviación, además que se observa que aparecieron dos (2) nuevas bandas de resonancia, p2 situada sobre los 3,135Hz y la banda de p5 situada sobre los 7,017Hz. También cabe resaltar que la banda de resonancia del espectro con el vaso vacío p2, viene siendo la equivalente con la banda p3 en el espectro del vaso lleno de agua, la cual en esta última se encuentra desplazado en aproximadamente 200Hz hacia la derecha.

Tabla 2. Bandas de resonancia del espectro del vaso lleno de agua

	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
Bandas	p1	p2	P3	p4	p5
Prueba r1	1,416	3,135	4,506	6,511	7,017
Prueba r2	1,420	3,135	4,506	6,511	7,017
Prueba r3	1,416	3,135	4,509	6,511	7,015
Promedio	1,417	3,135	4,507	6,511	7,016
Desviación	2.31	0	2	0	1.15

3.4. Prueba con alcohol al 70% y 95%

Para lograr una mayor confianza en los resultados, se realizaron pruebas con sustancias químicas no viscosas,

entre ellas el alcohol, donde también se quería corroborar el grado de repetibilidad de las bandas de resonancia a tres (3) eventos similares.

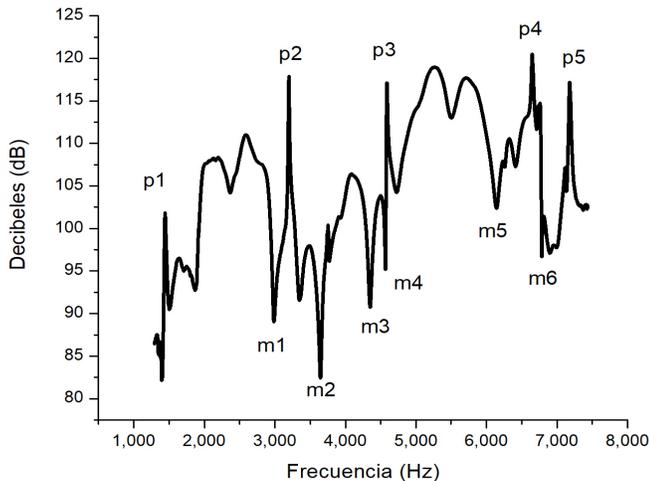


Figura 5. Espectro del alcohol al 70%.

En la figura 5 tenemos el espectro acústico del alcohol al 70%, donde se observa un parecido con el espectro del agua, ya que presenta cinco (5) bandas de resonancia bien marcadas (p1, p2, p3, p4 y p5), pero se diferencia en que solo presenta seis (6) mínimos. En la Tabla 3 se pueden observar como las bandas de resonancia se desplazaron hacia la derecha en casi 150Hz, con respecto al espectro del agua. Además, se observa una buena repetibilidad y una baja desviación.

Tabla 3. Bandas de resonancia del espectro de alcohol al 70%

	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
Bandas	p1	p2	p3	p4	p5
Prueba r1	1,446	3,197	4,589	6,655	7,184
Prueba r2	1,446	3,197	4,583	6,647	7,176
Prueba r3	1,446	3,197	4,585	6,647	7,176
Promedio	1,446	3,197	4,586	6,650	7,179
Desviación	0	0	3.06	4.62	4.62

Se repitió el mismo procedimiento para alcohol con una concentración distinta, en este caso al 95 %. A continuación, observaremos los resultados de las mencionadas pruebas.

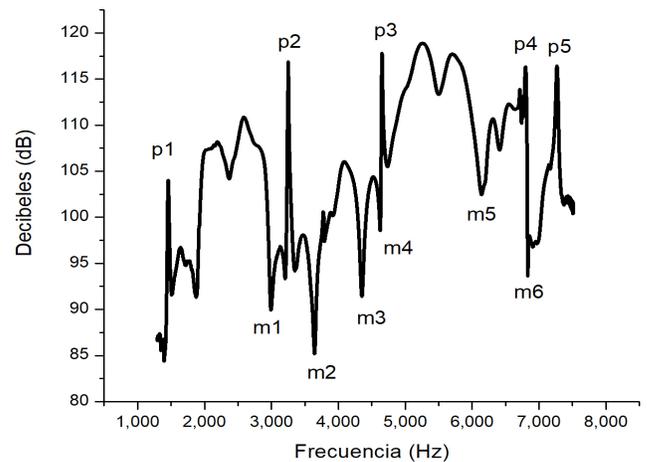


Figura 6. Espectro del alcohol al 95%.

En la figura 6 podemos observar el espectro acústico formado con el alcohol al 95%, este al igual que alcohol al 70% presenta cinco (5) bandas de resonancia bien definidas (p1, p2, p3, p4 y p5), y seis (6) mínimos. En la Tabla 4 se presentan las frecuencias de cada banda de resonancia notando que las mismas se encuentran desplazadas hacia la derecha con respecto a las bandas presentadas con el alcohol al 70%, el desplazamiento es de aproximadamente 100Hz. También podemos decir que se tiene una buena repetibilidad y baja desviación.

Tabla 4. Bandas de resonancia del espectro de alcohol al 95%

	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
Bandas	p1	p2	p3	p4	p5
Prueba r1	1,458	3,250	4,654	6,798	7,278
Prueba r2	1,458	3,250	4,651	6,798	7,272
Prueba r3	1,455	3,250	4,650	6,790	7,265
Promedio	1,457	3,250	4,651	6,795	7,271
Desviación	1.73	0	2.08	4.62	6.51

3.5. Análisis y discusión de resultados

En todas las pruebas realizadas al equipo, pudimos observar una buena repetibilidad y poca desviación en los resultados. En la prueba de la acústica de la cámara del equipo, esta se realizó para descartar algún tipo de banda de resonancia que pudiera incidir en el espectro de las muestras. En el espectro acústico de la cámara no se observó ninguna banda de resonancia.

En la prueba del vaso vacío se observan tres (3) bandas de resonancia bien definidas entre la región de los 1,800Hz y 6,000Hz, los cuales serán modificados por las muestras que contenga el vaso. Cuando se agregó los 200ml de agua a este, el espectro acústico formado mostró cinco (5) bandas de resonancia, con la aparición de dos (2) nuevas bandas de resonancia. Con relación a las bandas mostradas en el espectro del vaso vacío, se pudo notar que la banda p1 se desplazó hacia la izquierda en casi 200Hz. La banda p2 perteneciente al vaso vacío se relaciona con la banda p3 del vaso lleno de agua y la misma presentó un corrimiento de más de 200Hz y la banda p3 también perteneciente al espectro del vaso vacío se corrió en aproximadamente 500Hz hacia la derecha. Esto obviamente se debe al efecto del agua contenida en el vaso que modifica los modos de resonancia del vaso cilíndrico.

Cuando se realizaron las pruebas con el alcohol al 70% y 95% se pudo notar que presentaban la misma cantidad de bandas de resonancia que el espectro del agua, pero que diferían en la cantidad de mínimos. Además, que las bandas de resonancia en los alcoholes estaban más corridas hacia la derecha que las del agua.

3.6. Diferencias entre espectro de alcohol al 70% y 95%

Para evaluar la confiabilidad del equipo, se realizaron pruebas para determinar las diferencias entre estas sustancias.

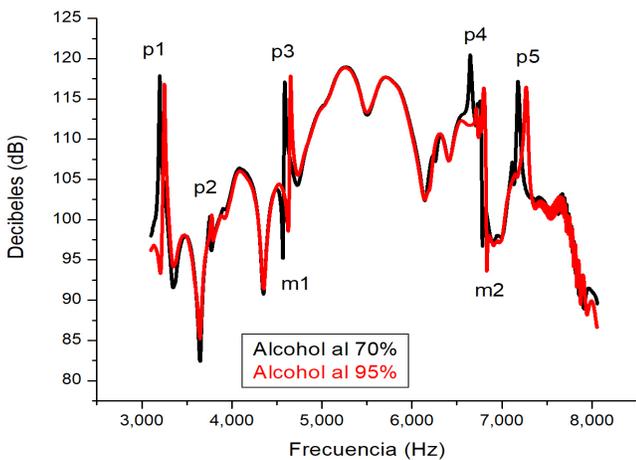


Figura 7. Espectro que muestra diferencias entre alcohol al 70 y 95 %.

En la figura 7 se observa los espectros acústicos, en los cuales se nota la diferencia entre los dos tipos de alcoholes, se puede ver un mayor desplazamiento en la banda p4 con respecto a las otras bandas de resonancia. En las bandas p1 y p3 hay un leve corrimiento hacia la derecha. También hay un corrimiento en los mínimos m1 y m2.

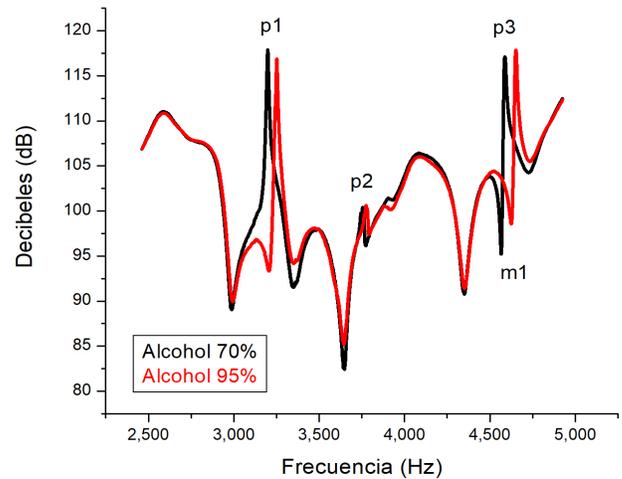


Figura 8. Espectro que muestra diferencias entre alcohol al 70% y 95 % en la región de baja frecuencia.

Como podemos visualizar en la figura 8, se pueden notar de manera ampliada los desplazamientos de las bandas de resonancia p1, p2, p3 y el mínimo m1.

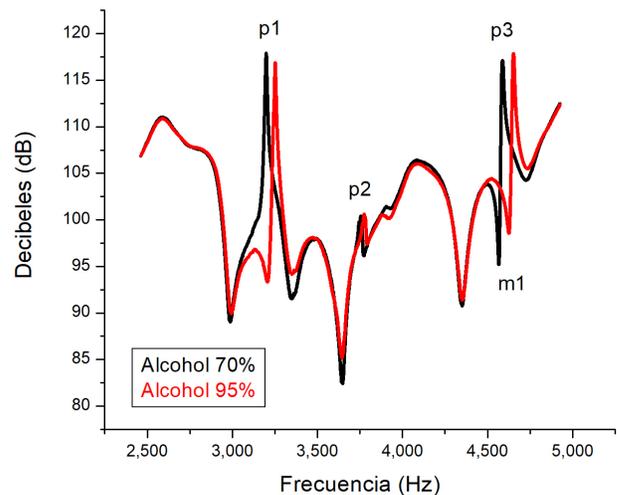


Figura 9. Espectro que muestra diferencias entre alcohol al 70% y 95 % en la región de alta frecuencia.

Como podemos observar en la figura a se pueden notar de manera ampliada los desplazamientos de las bandas de resonancia p4, p5 y el mínimo m2.

Cuando comparamos el alcohol de 70% y 95% se observa una diferencia muy definida entre los dos (2) espectros, notando un desplazamiento hacia la derecha más marcado en las bandas de resonancia de alta frecuencia p4 y p5. Como se mencionó anteriormente, en la banda de resonancia p4 es en donde se observa la mayor diferencia, de aproximadamente 145Hz. En la banda de resonancia p5 la diferencia es de 95Hz. Cabe señalar, además, que poder utilizar esta herramienta en el control de calidad del alcohol es importante en este tiempo donde hay un uso masivo debido al COVID-19.

Los resultados obtenidos repitiendo las pruebas bajo las mismas condiciones para cada sustancia evaluada muestra una muy buena repetibilidad con muy pocas variaciones de estas, lo cual es muy importante ya que le da confianza al equipo construido. Todo esto nos conduce a deducir que con otros tipos de sustancia también se podrían ver diferencias significativas, teniendo un potencial de aplicación como técnica analítica al momento de evaluar la característica de una sustancia.

4. Conclusiones

En el presenta trabajo se ha mostrado que el equipo de resonancia acústica construido muestra muy buena repetibilidad y se pueden ver diferencias entre sustancias líquidas, ya sean distintas o parecidas con diferentes concentraciones, lo cual puede ser muy útil para análisis in situ en una línea de proceso de una planta, ya sea de alimentos o de productos químicos.

En las futuras investigaciones a realizar sobre este proyecto, se harán pruebas sobre el deterioro en alimentos líquidos para evaluar si el equipo es capaz de detectar diferencias marcadas y poder utilizarlo como una herramienta en el control de calidad de los alimentos. Además, se utilizará el modelo de Berry y Reissner para predecir teóricamente las frecuencias de resonancias y compararlas con las obtenidas experimentalmente. En adición al deterioro, se podrá evaluar con este equipo las diferencias en las concentraciones de sólidos totales de diversos alimentos líquidos, como son los jugos, jarabes o salmueras para encurtidos.

Se desea construir un equipo que puede ser muy útil para diversos tipos de industrias.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica de Panamá y a la Facultad de Ciencias y Tecnología por brindar todo el apoyo durante todo el proceso de investigación y elaboración de este artículo. También quiero agradecer a todo el equipo del laboratorio Pierre-Marie Curie por sus consejos durante diversas etapas de la investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaramos que no tenemos ningún tipo de conflicto de interés con el proyecto presentado en este documento.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

J. Aranda contribuyó con la construcción del equipo, la fase experimental y la escritura del artículo científico. E. Ching contribuyó con el desarrollo del experimento, fundamento de los conceptos, la metodología y revisión del artículo.

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] D. Sinha "Acoustic Resonance Spectroscopy (ARS)", Manual de operaciones, Laboratorio los Álamos, Estados Unidos, julio 1996.
- [2] D. Veirs, J P. Baiardo, CR. Heiple, GM. Rosenblatt "Acoustic Resonance Spectroscopy (ARS) Shows Promise for Measuring Gas Composition and Pressure in Sealed Storage Containers", Materials Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory. los Álamos National Laboratory, Estados Unidos, 1996.
- [3] J. A Franco-Villafa, E. Flores-Olmedo, G. Báez, O. Gandarilla-Carrillo and R. A. Méndez-Sánchez "Acoustic resonance spectroscopy for the advanced undergraduate laboratory", "Physics Education"rev., Vol. 2012, doi: 10.1088/0143-0807/33/6/1761
- [4] C. Espinoza, R. Espinoza, F. Lund, N. Mujica "Uso de Espectroscopía de Resonancia Ultrasónica No Lineal como herramienta para la caracterización de densidad de dislocaciones en la materia" en XIX Simposio Chileno de Física, Santiago, Chile, 2008, doi: 10.13140/RG.2.2.30179.50722

- [5] J. medendorp, R. Buice, R. Lodder, "Acoustic-resonance spectrometry as a process analytical technology for the quantification of active pharmaceutical ingredient in semi-solids", "AAPS PharmSciTech" Rev., Vol. 2006-Septe, doi: 10.1208/pt070359
- [6] Hany. S. El-Mesery, H Mao "Application of Non-destructive Technologies for agricultural and food products Quality inspection", "Sensors (Basel)", Rev., vol. 2019-Feb, doi: 10.3390/s19040846.
- [7] W. Zhang, A. Wang, Z. Lv, Z. Gao "Nondestructive measurement of kiwifruit firmness, soluble solid content (SSC), titratable acidity (TA), and sensory quality by vibration spectrum", "Food Science and nutrition" rev. Vol. 2020, doi:10.1002/fsn3.1390
- [8] W. Zhang, LV. Zhenzhen, S. Xiong "Nondestructive quality evaluation of agro-products using acoustic vibration methods-A review", "Critical reviews in food Science and nutrition", Rev., vol.2018, doi:10.1080/10408398.2017.1324830. "
- [9] Li Sun, Xia-Kun Bi, Hao Lin, Jie-wen Zhao, Jian-rong Cai "On-Line detection of eggshell crack based on acoustic resonance analysis", "Journal of food Engineering Rev., vol. 2012 doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.11.001>
- [10] De Ketelaere, B., Howarth, M. S., Crezee, L., Lammertyn, J., Viaene, K., Bulens, I., & De Baerdemaeker, J. (2006). Postharvest firmness changes as measured by acoustic and low-mass impact devices: a comparison of techniques. *Postharvest Biology and Technology*, 41(3), 275-284.
- [11] Deng, X., Wang, Q., Chen, H., & Xie, H. (2010). Eggshell crack detection using a wavelet-based support vector machine. *Computers and electronics in agriculture*, 70(1), 135-143.
- [12] Lin, H., Zhao, J. W., Chen, Q. S., Cai, J. R., & Zhou, P. (2009). Eggshell crack detection based on acoustic response and support vector data description algorithm. *European food research and technology*, 230(1), 95-100.
- [13] Deng, X., Wang, Q., Chen, H., & Xie, H. (2010). Eggshell crack detection using a wavelet-based support vector machine. *Computers and electronics in agriculture*, 70(1), 135-143.
- [14] Wang, H., Mao, J., Zhang, J., Jiang, H., & Wang, J. (2016). Acoustic feature extraction and optimization of crack detection for eggshell. *Journal of food engineering*, 171, 240-247.
- [15] Pedram Shoa, Seyed Ahmad Mireei, Abbas Hemmat, Sara W. Erasmus, Saskia M. Van Ruth "Broadband Acoustic Resonance dissolution spectroscopy as rapid tool for the compositional analysis of food powders: A case study of edible salts", "Food Chemistry" Rev., vol. 2021 doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129287>
- [16] Van Ruth, S., Dekker, P., Brouwer, E., Rozijn, M., Erasmus, S., & Fitzpatrick, D. "The sound of salts by broadband acoustic resonance dissolution spectroscopy" "Food Research International", 116, 1047-1058. Rev., vol. 2019 doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.09.044>
- [17] Tunick, M. H., Onwulata, C. I., Thomas, A. E., Phillips, J. G., Mukhopadhyay, S., Sheen, S., ... & Cooke, P. H. "Critical evaluation of crispy and crunchy textures", A review. "International Journal of Food Properties" Rev., vol. 2013 doi: 10.1080/10942912.2011.573116
- [18] Juodeikienė, G., Kunigėlis, V., Vidmantienė, D., & de Koe, W. J "Acoustic screening method for the determination of deoxynivalenol (DON) in wheat", "Veterinarija ir zootechnika, Lietuvos veterinarijos akademija". Rev., vol. 2004, ISSN, 1392-2130.
- [19] Zhang, W., Lv, Z., & Xiong, S. "Nondestructive quality evaluation of agro-products using acoustic vibration methods", "Critical reviews in food science and nutrition", Review , Rev., vol. 2018 doi: 10.1080/10408398.2017.1324830
- [20] Rao, X., Ying, Y., Lv, F., & Jin, B. "Development of a fruit quality inspecting system based on acoustic properties". "T. CSAM", 2, 69-71. Rev., vol. 2003. Record number: 20033046068
- [21] Sun, T., Huang, K., Xu, H., & Ying, Y. "Research advances in nondestructive determination of internal quality in watermelon/melon", "Journal of Food Engineering", A review, Rev., vol . 2010. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.05.019>
- [22] Fitzpatrick, D., Evans-Hurson, R., Krüse, J., Vos, B., McSweeney, S., Casaubieilh, P., & O'Gorman, É "The relationship between dissolution, gas oversaturation and outgassing of solutions determined by Broadband Acoustic Resonance Dissolution Spectroscopy (BARDS)". "Analyst", Rev., vol.2013 138(17), 5005-5010. <https://doi.org/10.1039/C3AN36838F>
- [23] García-Ramos, F. J., Valero, C., Homer, I., Ortiz-Cañavate, J., & Ruiz-Altisent, M. "Non-destructive fruit firmness sensors: a review", "Spanish Journal of Agricultural Research", Rev. vol. 2005 3(1), 61-73. doi:10.5424/sjar/2005031-125
- [24] Zhang, W., Cui, D., Liu, Z., & Ying, Y. "Analysis of pear dynamic characteristics based on harmonic response", "Transactions of the ASABE", Rev., vol. 2016 doi: 10.13031/trans.59.11845
- [25] Chen, P., Sun, Z., & Huarng, L "Factors affecting acoustic responses of apples", "Transactions of the ASAE", Rev. vol. 1992. doi: 10.13031/2013.28815
- [26] Zude, M., Herold, B., Roger, J. M., Bellon-Maurel, V., & Landahl, S. (2006). Non-destructive tests on the prediction of apple fruit flesh firmness and soluble solids content on tree and in shelf life. *Journal of Food Engineering*, 77(2), 254-260.
- [27] Valente, M., Leardi, R., Self, G., Luciano, G., & Pain, J. P. (2009). Multivariate calibration of mango firmness using

- vis/NIR spectroscopy and acoustic impulse method. *Journal of Food Engineering*, 94(1), 7-13.
- [28] Mendoza, F., Lu, R., & Cen, H. (2012). Comparison and fusion of four nondestructive sensors for predicting apple fruit firmness and soluble solids content. *Postharvest Biology and Technology*, 73, 89-98.
- [29] H. Norman Abramson, Daniel D. Kana, Ulric S. Lindholm "Breathing vibrations of a circular cylindrical shell containing an internal liquid", "Southwest Research institute", reporte técnico preparado para "The National Aeronautics and Space administration", Washington D.C. ad: ADB186288.
- [30] Lin, Kevin Yi-Wei, "Nondestructive Evaluation of Solid Cargo Inside Cylindrical Containers By using Linear and Nonlinear Acoustic Resonance Spectroscopy", "Electronic Theses and Dissertations", Rev., vol. 2020, 1822, <https://egrove.olemiss.edu/etd/1822>.
- [31] C. Ding, Z. Feng, D. Wang, Di Cui, W. Li "Acoustic vibration technology: Toward a promising fruit quality detection method", "Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety", Rev., vol. 2021-Mar, doi: 10.1111/1541-4337.12722



Escriba en este espacio el título del artículo en español

(El título debe ser centrado, con solo la primera palabra iniciada en mayúscula, tipo de fuente Times New Roman 18, negrita, a espacio sencillo y no debe contener más de 15 palabras. No se debe cambiar el color de la fuente. Se debe dejar un espacio de 12 puntos entre el título en español e inglés)

Escriba en este espacio el título del artículo en inglés

The title must be centered, with the first word capitalized, font type Times New Roman 14, single-spaced and must not contain more than 15 words. Do not change the font color. (A space of 10 points must be left between the title in English and the names of the authors)

*Autor 1¹, Autor 2¹, Autor 3², ..., Autor de correspondencia ⁿ** (Times New Roman 10)

(Información de autores: *Nombre Inicial del segundo nombre. Apellido 1-Apellido 2 ó Inicial del Apellido 2*. El autor puede anotar su nombre según la combinación que sea ya reconocida públicamente, pero siempre empezando por Nombre y después Apellido. Los autores deben ser separados mediante comas. Ejemplo: *Zoila Y. Guerra-de Castillo ¹**, *Zoila Y. Guerra-de Castillo ¹*, *Zoila Y. Guerra-de Castillo ³*, ...⁴, ...⁵. El primer autor debe ser el autor de correspondencia (en caso de tesis, se debe colocar el autor de referencia el correo electrónico del profesor o investigador a cargo).

^{1...n}*Afilación: (Times New Roman 10, cursiva). En línea separada de los nombres, describa la unidad, grupo de investigación y entidad a la que está afiliado cada autor. Autores con igual afiliación, usan el mismo número de afiliación.

***Autor de correspondencia:** ejemplo.nombre@ejemplo.com (Times New Roman 9). Utilice únicamente el correo institucional.

Es obligatorio que cada autor incluya su número Orcid a la hora de someter su manuscrito, a través de la plataforma de Revistas UTP, en la sección "Comentarios para el Editor".

RESUMEN. Este documento proporciona instrucciones a los autores sobre el formato de los artículos para su publicación en la Revista de I+D Tecnológico (RIDTEC). El autor debe seguir las instrucciones de este documento y usarlo como plantilla sobre la que puede escribir su propio texto. Use el documento como plantilla para escribir sobre ella, eliminando todo lo que no sea parte de su manuscrito. Cada sección de la plantilla está formateada con los detalles y especificaciones necesarios para cumplir con los requisitos de la revista. Todo trabajo debe presentar un resumen de 200 a 250 palabras. El título "**RESUMEN**" (mayúscula cerrada, negrita, Times New Roman 12). El cuerpo del resumen debe escribirse con fuente (Times New Roman 10), y sigue inmediatamente después del título "Resumen" en el mismo párrafo. Es de obligado cumplimiento que el resumen declare los objetivos, metodología, resultados y conclusiones de la investigación reportada, según se describe a continuación: **Objetivos**, declare en una o dos frases, los objetivos de la investigación. **Metodología**, debe resumir métodos, equipos e instrumentos, normas, materiales, participantes, lugar y fechas de referencia del estudio. **Resultados**, expresar en tres a cuatro frases los resultados puntuales de la investigación. **Conclusiones**, describir las conclusiones importantes en una a dos frases. Nota: En esta sección no debe usarse citas o referencias, acrónimos o abreviaturas, ni simbología matemática que requiera explicación.

Palabras clave. El título "**Palabras clave**" debe ir en negrita, (Times New Roman 12), alineado a la izquierda. Incluya de tres a seis palabras o frases clave (Times New Roman 10, cursiva), inmediatamente después "Palabras clave", en el mismo párrafo, **deben aparecer en orden alfabético**, separadas por comas y solo la primera palabra en mayúscula.

ABSTRACT. This document provides instructions to authors on the format of articles for publication in RIDTEC. The authors must follow the instructions in this document and use it as a template on which to write their own text. Use the document as a template to write about, deleting anything that is not part of your manuscript. Each section of this template is formatted with the necessary details and specifications to meet the journal's requirements. All work must present an abstract of between 200 and 250 words. The title "**ABSTRACT**" (bold, capital letter, Times New Roman 12). The body of the abstract must be written in (Times New Roman 10), and it follows immediately after the abstract heading in the same paragraph. It is mandatory that the abstract declare the objectives, methodology, results and conclusions of the reported research, as described below: **Objectives**, state in one or two

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/>).

sentences, the objectives of the research. **Methodology**, should summarize methods, equipment and instruments, standards, materials, statistical analyses, participants, place and reference dates of the study. **Results**, express the specific results of the research in three to four sentences. **Conclusions**, describe the important conclusions in one to two sentences. In this section, do not use citations or references, acronyms or abbreviations, or mathematical symbols that require explanation. It is mandatory for each author to include their Orcid number when submitting their manuscript, through the UTP Journal platform, in the "Comments for the Editor" section.

Keywords. Include three to six key words or phrases, they must appear in the order in which they appear in Spanish, separated by commas and only the first word capitalized. The title "Keywords" should be in (bold, Times New Roman 12). Then write the key words or phrases in (Times New Roman 10, cursive), immediately after "Keywords", in the same paragraph.

1. Introducción

De carácter obligatorio incluir en el documento. La palabra "**Introducción**" (Times New Roman 14, negrita, numerada). El cuerpo del texto se escribe con fuente (Times New Roman 11, justificado). Este documento proporciona instrucciones a los autores sobre el formato de los artículos para su publicación en RIDTEC. El autor puede utilizar este documento como instrucciones y como una plantilla en la que puede escribir su propio texto. Use esta plantilla para escribir sobre ella, cada sección de esta plantilla está formateada con los detalles 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). Elimine sobre la marcha, todo material que no sea parte del manuscrito. Observe que, en la sección Introducción de esta plantilla, estamos presentando todas las instrucciones de formato del artículo. Las secciones siguientes 2, 3, 4 y las no enumeradas, son parte obligada del artículo y no deben variar de numeración ni de orden.

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.

En la sección Introducción, el autor 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 con el estado del arte.
- Descripción de la estructura del artículo.

Todos los componentes de un artículo estándar han sido especificados por tres razones: 1) fácil uso al preparar el documento, 2) cumplimiento de los requisitos electrónicos que facilitan la producción de artículos electrónicos, y 3) márgenes, columnas, espaciado interlineal y estilos de letras son incorporados. Ejemplos de estilos de letras son proporcionados a lo largo de este documento; así como algunos componentes, tales como ecuaciones, gráficas y tablas. El autor necesitará crear estos componentes incorporando los siguientes criterios: use estilos, fuentes y tamaños de letras tal como se definen en esta plantilla, no las cambie o redefina de ninguna manera para evitar alteraciones en la plantilla.

A continuación, se detallan el formato de las partes componentes del artículo.

1.1 Título del artículo

El título del artículo debe ser breve e informativo, reflejando el hallazgo contenido en el artículo y debe estar en (Times New Roman 18, 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, por ejemplo: un, una, sobre, el, etc.

El título debe contar con su respectiva traducción al inglés o al español, según el idioma base del artículo y tamaño de fuente (Times New Roman 14, negrita y centrada). 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.

1.2 Nombre de los autores, afiliaciones y correo

El nombre de autores incluye primer nombre seguido del primer apellido e inicial de segundo apellido. No debe mostrar ningún título profesional, tal como gerente, director, etc., ningún título académico o membresía de ninguna organización profesional (ejemplo. miembro de la IEEE).

Cada afiliación debe incluir los siguientes elementos: unidad a la que está adscrito, grupo de investigación, entidad a la que está afiliado y el correo electrónico del autor de correspondencia. Este último elemento es obligatorio porque facilita la comunicación entre autores y el lector.

Los autores 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 ID1* y *WoS2*.

1.3 Diseño de página

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: superior 3.97 cm, inferior 2.5 cm, izquierdo 1.5 cm y derecho 1.5 cm. 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.

1.4 Encabezado de Página de la primera página

No modificar.

1.5 Pie de página de la primera página

No modificar.

1.6 Tipos de letra y estilos

Utilice un procesador de texto con el tipo de letra (Times New Roman). Evite el uso de “bit-mapped fonts”. 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.

1.7 Texto principal

Escriba el texto principal en (Times New Roman, 11) puntos a espacio sencillo. El artículo debe seguir la regulación de formato de IEEE. Las secciones obligadas, después de Título y Palabras clave, son: 1. Introducción, 2. Materiales y métodos, 3. Resultados y discusión, 4. Conclusiones, Agradecimientos, Conflicto de intereses, Contribución y aprobación de los autores, Referencias. Solo se enumeran las secciones de 1 a 4, mantenga la numeración y el orden de las secciones.

Las referencias se identificarán en el texto mediante números arábigos entre corchetes, alineados con la escritura ([2] como ejemplo). Al terminar una oración se coloca la referencia y luego el punto final [2]. Se enumerarán por orden de aparición en el texto. No utilice expresiones tales como “Ref. [3]” o “Referencia [3]”, excepto al inicio de una oración, ejemplo “La referencia [3] muestra...”.

Múltiples referencias deben enumerarse en corchetes separados (ej. [2], [3], [4-6]).

Los espacios entre secciones deben ser de 10 puntos. El texto principal debe ser justificado.

1.8 Títulos de las secciones

En las secciones y subsecciones no deben utilizarse más de tres niveles de títulos. Otros títulos (subsecciones) deben tener una fuente de 10 puntos excepto los títulos de primer nivel, que son de 14 puntos. Los títulos no llevan punto al final.

- Primer nivel de título: un título en el nivel uno debe estar justificado a la izquierda, (Times New Roman, 14). y enumerado con números arábigos seguido por un punto, ejemplo: “**2. Materiales y métodos**”. Los títulos “Agradecimientos”, “Conflictos de intereses” y “Referencias”, “Anexos”, no deben ser enumerados.
- Segundo y tercer nivel de título: los títulos en el nivel dos y tres deben estar justificados a la izquierda y enumerados con números arábigos, (Times New Roman, 10, negrita). Por ejemplo, “**1.6 Figuras y tablas**” o “**1.6.1 Título de figura**”. Al igual que los demás títulos, la numeración de estos subtítulos no culmina 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 10 puntos.

1.9 Figuras y tablas

Las leyendas de figuras (colocadas al pie de la figura) y títulos de las tablas (colocados en el encabezado de la tabla), deben ser en (Times New Roman, 8). 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 se adjuntan por separado del artículo indicando el espacio donde estará ubicada en el documento y la fuente de esta. El nombre de la imagen debe indicar la numeración con números arábigos y el título completo de la figura. Ejemplo. Figura 1. Ejemplo de título de figura.jpeg.

1.9.1 Título de la figura

Las figuras deben ser enumeradas con números arábigos y fuente (Times New Roman, 8). Los títulos de figuras deben estar justificados y llevar punto al final (ejemplo: ver figura 1).

La mención de una figura en el texto del artículo debe realizarse antes de su aparición, tal como se aprecia con la figura 2 y la palabra figura debe ir en minúscula dentro del párrafo.

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*). Debe ser en formato jpeg o tiff. 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.

Se deja un espacio de 11 puntos entre los párrafos arriba y abajo y la información de la figura.

Figura 1. Ejemplo de título de figura.
Fuente: Universidad Tecnológica de Panamá.

1.9.2 Título de las tablas

Las tablas deben enumerarse con números arábigos. Los títulos de las tablas deben centrarse, colocarse en la parte superior, no llevan punto al final y con fuente (Times New Roman, 8). La mención de una tabla en el texto del artículo debe realizarse antes de su aparición. Dentro de las tablas los títulos deberán ir en negrita ver tabla 1.

Tabla 1. Ejemplo de títulos de tablas

Nº	Artículo	Cantidad
1	Volumen 6.0	25
2	Volumen 6.1	20
3	Volumen 6.2	15

1.9.3 Fuentes de referencia

El autor es responsable de garantizar el cumplimiento de los requisitos de propiedad intelectual establecidos para información, imágenes y tablas. En caso de que la imagen, tabla o grafica no sea de su autoría deberá colocar el autor o fuente correspondiente ver figura 2. La palabra fuente va en negrita seguido de dos puntos, la información debe estar justificada y llevar punto al final.

1.10 Enlaces (Links) y marcadores (bookmarks)

Los enlaces y marcadores deben ser removidos del artículo durante el proceso de elaboración. Si usted necesita hacer referencia a un URL en su artículo, usted debe escribir completamente la dirección URL con una fuente regular.

1.11 Ecuaciones y símbolos químicos

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 10.

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.

Las ecuaciones deben enumerarse secuencialmente a lo largo del artículo. El número de la ecuación debe encerrarse entre paréntesis, ubicado totalmente al margen derecho como en (1) y (2).

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1)$$

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.

$$\int_0^2 F(r, \varphi) dr d\varphi = [\sigma_2 / (2\mu_0)] \quad (2)$$

$$\int_0^\infty \exp(-\lambda |z_j - z_i|) \lambda^{-1} J_1(\lambda r_2) J_0(\lambda r) d\lambda$$

Los símbolos de las ecuaciones deben ser definidos antes o inmediatamente después de la ecuación; utilice letra cursiva *Times New Roman 10*. En cuanto a la referencia de la ecuación dentro del contexto del artículo, debe ir en minúscula y sin punto al finalizar el texto. Por ejemplo: “En la ecuación (1) se muestra el resultado estimado”. No se aceptan las abreviaciones de las ecuaciones como: “Ec. (1)”, “eq. #1” o “ecuación N°1”. Las ecuaciones extraídas de fuentes externas deberán señalar la fuente.

Los símbolos como el de porcentaje y las unidades deben estar unidas a los números. Las unidades de miles en los números se separan con coma. Los puntos decimales, se separan con punto. No muestre más de dos cifras decimales, salvo que justifique su exactitud.

Recuerde que las unidades numéricas con su respectiva magnitud deben estar unidas. Ejemplo: 30°C o 25%.

1.12 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, la UTP declina toda responsabilidad por los derechos que pudiera derivarse de la lectura, interpretación, responsabilidad y uso del contenido de los trabajos publicados.

Los autores deben acatar el principio de libre acceso en revistas 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).

2. Materiales y Métodos/Metodología

De carácter obligatorio incluir en el documento. Este título en (*Times New Roman 14*, negrita). En artículos correspondientes a investigaciones experimentales, use como título de esta sección “**Materiales y métodos**”; en el caso de artículos de revisión, use como título “**Metodología**”. En esta sección el autor debe presentar

y detalladamente todo lo referente al trabajo realizado, incluyendo, pero no limitado a: diseño y tipo de investigación, población/muestra estudiada, materiales y métodos utilizados, equipos e instrumentos con sus especificaciones y origen de fabricación, instrumentos de recopilación de datos, fechas y lugares, protocolos y normas utilizados, criterios estadísticos para el análisis de datos, experimentos realizados. En el caso de artículos de revisión, el autor debe incluir los criterios de búsqueda y selección del material utilizado, bases de datos utilizadas, controles aplicados, criterios de selección de información y métodos de análisis de la información, etc.

3. Resultados y discusión

De carácter obligatorio incluir en el documento. Este título en (*Times New Roman 14*, negrita). En artículos correspondientes a investigaciones experimentales, use como título de esta sección “**Resultados y discusión**”; en el caso de artículos de revisión, use como título “**Desarrollo y discusión**”. 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 uno de cada cinco ejemplares de Santiago han demostrado resistencia a los medicamentos."

Cuando una oración inicia con un número, debe escribirse el número en letras. En cualquier otra parte del texto, 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. Debe hacerse comparación y discusión de los resultados obtenidos, con estudios previos, ya sea que los avalen o no. Explicar las similitudes o las diferencias.

Se recomienda extremar el poder de síntesis evitando repeticiones innecesarias. Las figuras, gráficas y tablas

deben seguir las indicaciones dadas previamente. No debe presentar la misma información en formatos de imagen y tabla, use solo una de estas alternativas.

4. Conclusiones

De carácter obligatorio incluir en el documento. Este título en (Times New Roman 14, negrita). Las 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.

AGRADECIMIENTOS

De carácter obligatorio incluir en el documento. Este título en (mayúscula cerrada, Times New Roman 12, negrita). En esta sección se podrá incorporar a las personas, grupos u organizaciones que hayan colaborado o apoyado en la investigación que se reporta. Ejemplo “A Juan Pérez por su asistencia técnica”. Se puede dar reconocimiento a patrocinadores por el apoyo financiero: “Este trabajo fue financiado por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación bajo el acuerdo xyz”. No iniciar los agradecimientos con la misma palabra del título, queda tácito. No es necesario incluir en el agradecimiento al asesor ni a cualquier otra persona que aparezca como coautor del trabajo. Importante también agradecer a la institución que hospeda, soporta o cofinancia el proyecto.

CONFLICTO DE INTERESES

De carácter obligatorio incluir en el documento. Este título en (mayúscula cerrada, Times New Roman 12, negrita). El objetivo de esta sección es esclarecer que los autores y el trabajo presentado, no presentan conflictos de intereses con ningún patrocinador o agencia con interés en los resultados del proyecto. Seleccione la opción correspondiente (la que corresponda con exactitud) y borre el resto de este contenido.

- Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.
- Los autores declaran conflicto de intereses, según se detalla a continuación:

(De existir conflicto de interés en uno o más coautores, proceda a declarar los conflictos de interés individualmente).

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

De carácter obligatorio incluir en el documento. Este título en (mayúscula cerrada, Times New Roman 12, negrita). En esta sección se debe indicar la contribución de cada uno de los coautores, en la investigación, experimentación, así como en la conceptualización, preparación y corrección del artículo. Para esto, utilice las iniciales de cada coautor, e indique su aporte al artículo y el porcentaje correspondiente a su contribución.

Finalmente, en una línea separada, escriba la siguiente declaración:

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

De carácter obligatorio incluir en el documento. Este título en (mayúscula cerrada, Times New Roman 12, negrita). Las listas de referencias deben seguir el estilo de la IEEE y deben estar en (Times New Roman, 9). Todas las referencias deben aparecer citadas en el documento y viceversa, todas las citas en el texto deben ser listadas en las referencias.

El autor tiene la libertad de utilizar un administrador de fuentes bibliográficas que incluyen los procesadores de texto o un *software* específico. La letra de las citas debe ser (Times New Roman, 9).

Deben utilizarse un mínimo de 30 referencias de artículos de revistas indexadas, preferiblemente publicados en los últimos cinco años. El autor es responsable de la exactitud del contenido y citación de todas las referencias.

A continuación, ejemplos de diferentes categorías de referencias no debe colocarse punto porque se puede confundir con el enlace:

- **Citación de un artículo de revista:** Iniciales y Apellido del autor, "Título del artículo entre comillas", Título abreviado de la revista en cursiva, volumen abreviado (vol.), número abreviado (no.) páginas abreviado (pp.), Mes Año.

[1] O. Aguilar, R. Maghirang, C. W. Rice, S. L. Trabue and L. E. Erickson. "Nitrous Oxide Fluxes from a Commercial Beef Cattle Feedlot in Kansas", *Air, Soil and Water Research*, vol. 2014, no. 7, pp. 35-45, Nov. 2013.

- **Citación de un artículo de congreso publicado:** Iniciales y Apellidos del autor, "Título del artículo de conferencia entre comillas" en Nombre completo del congreso, Ciudad de la conferencia, año, páginas (abreviado pp.).

[2] D. Navarro Alaín, J. J. Lay Pérez y O. Aguilar. "Paja Canalera (*Saccharum spontaneum*), especie herbácea invasiva como potencial recurso energético en Panamá", en International Engineering, Science and Tecnology Conference, Panamá, 2019, pp. 99-107.

- **Citación de un libro:** Iniciales y Apellido del autor, *Título del libro en cursiva*. Edición. Lugar de publicación: Editorial, Año de publicación.

[3] H. Motulsky. *Intuitive Biostatistics*. 2da. ed. New York: Oxford University Press, 2010.

- **Citación de un documento electrónico:** Iniciales y Apellido del autor (año, mes y día). Título (edición) [Online]. Available: Url.

[4] A. Paul. (1987, Oct. 10). "Electrical properties of flying machines." (2da ed.) [Online]. Available: www.flyingmachjournal/properties/fly.edu

NOTA: los recursos en internet incluyen múltiples posibilidades (revistas, artículos, monografías, sitios web de entidades, bases de datos, etc.) En general, se citan como el documento impreso del tipo al que pertenecen, añadiendo la indicación [Online] y el DOI si está disponible o su url.

ANEXOS

Este título en (mayúscula cerrada, Times New Roman 12, negrita). Este apartado no es obligatorio. Se usa para incluir cualquier tipo de material importante para justificar los resultados del trabajo, pero que no pueda presentarse en el desarrollo continuo del artículo.

Anexo 1. Ejemplo de redacción del resumen en los manuscritos sometidos a RIDTEC. (Este título en Times New Roman 12, negrita).

RESUMEN. [Introducción] La emisión de gases de efecto invernadero, incluido el óxido nítrico (N_2O), de los corrales de engorde de ganado vacuno a gran escala, es ya una preocupación ambiental. [Objetivo] Este estudio se realizó para cuantificar los flujos de emisión de N_2O en función de las condiciones de la superficie del corral, en una hacienda

industrial de engorde de ganado vacuno, en el estado de Kansas, USA, desde julio de 2010 hasta septiembre de 2011. [Metodología] El período de medición representó las condiciones típicas del corral de engorde, con temperaturas del aire que oscilaron entre -24 a $39^\circ C$. Se utilizaron cámaras estáticas de medición de flujo para recolectar muestras de gas de las superficies de los corrales a los 0, 15 y 30 minutos de instaladas las cámaras. Las muestras fueron analizadas mediante cromatografía de gases. Los flujos de N_2O emitidos del suelo se determinaron a partir de las concentraciones medidas. [Resultados] El flujo medio de emisión de la condición superficial húmeda/fangosa fue de $2.03 \text{ mg m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$, lo que resultó ser 20 veces mayor que los flujos de N_2O en otras condiciones de la superficie de corral. Los picos emitidos de N_2O de esa condición superficial fueron seis veces mayores que picos de emisión previamente reportados para suelos agrícolas. [Conclusión] Se reporta que, en función del estado superficial de los corrales, los flujos de emisión de N_2O se ven afectados por una o más propiedades del suelo tales como humedad, temperatura, pH y contenido total de C, NO_3^- y NH_4^+ .

Fuente: Tomado y traducido al español de: Aguilar et al. Nitrous Oxide Fluxes from a Commercial Beef Cattle Feedlot in Kansas. *Air, Soil and Water Research* 2014;7:35-45 doi:10.4137/ASWR.S12841.

NOTA: Este formato del resumen es de obligatorio cumplimiento (las palabras entre [corchetes] son solo como guía, no deben aparecer en el resumen).

VIII Congreso Internacional de Ingeniería, Ciencias y Tecnología-IESTEC

8th International Engineering, Sciences 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



LLAMADO A PONENCIA
ENTREGA DE ARTÍCULOS- <http://congreso.utp.ac.pa>

    @CongresoUTP

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:

- ◆ 1 de agosto de 2022
 - ◆ 5 de septiembre de 2022
 - ◆ 19 de septiembre de 2022
 - ◆ 30 de septiembre de 2022
- Fecha Extendida para la subida del artículo
Notificación a los autores
Último día para subir la versión final del artículo
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:





U.S. EMBASSY - PANAMA



BID

Mejorando vidas



IEEE

IEEE Sección Panamá



SENACYT

Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación

Nos encargamos de

MEDIR
AGILIZAR
SISTEMATIZAR
tus eventos

e
eSimposio
Sistema Gestor de Eventos

CONTROL ASISTENCIA
PRESENCIALES
VIRTUALES
HÍBRIDOS
APPS
FERIAS VIRTUALES
CERTIFICACIÓN DIGITAL
STREAMING
REGISTRO
PAGO EN LÍNEA



CONTACTANOS:

2636218 Móvil: 6365-9930

contacto@esimposio.com

www.esimposio.com

Miesimposio @esimposio



Copa Airlines



REPÚBLICA DE PANAMÁ
GOBIERNO NACIONAL

PRO PANAMA

AUTORIDAD PARA LA ATRACCIÓN DE INVERSIONES
Y LA PROMOCIÓN DE EXPORTACIONES

ITSE

EDUCACIÓN SUPERIOR
DE CICLO CORTO



CENAMEP AIP



IESTEC

IEEE Xplore[®]
Digital Library



FIRST QUANTUM
MINERALS LTD.

Cobre Panamá



WYNDHAM[®]

Panama Albrook Mall
Hotel & Convention Center

JIO JORNADA DE INICIACIÓN CIENTÍFICA



Final JIC UTP 2022

4 de agosto

Centro Regional de Azuero



@utppanama

Premios y Reconocimientos



VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN, POSTGRADO Y EXTENSIÓN
DIRECCION DE INVESTIGACIÓN
IX TNI - UTP

ALINEANDO LA INVESTIGACION E INNOVACIÓN AL DESARROLLO SOSTENIBLE

2 HAMBRE CERO



3



6 AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO



7 ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE



9 INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA



12 PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES



14 VIDA SUBMARINA



Sábado 20 de agosto del 2022, de 9:00 a.m. a 3:00 p.m.

Modalidad: virtual

Programa Matutino

9:00 am - 11:25 am

Propuesta Premio Nacional ODS
Dr. Julio Rodríguez

Comité de Bioética de la Investigación
Dra. Norma Miller

Objetivos de sostenibilidad y medio ambiente. (QS, Greenmetric)
Mgtr. Axel Martínez

Resultados de los Talleres Nacionales
Dra. Elida de Obaldía

Importancia del perfil digital de investigador en la publicación científica
Mgtr. Danny Murillo

Nueva plataforma SIIC, avances y presentación del prototipo funcional
Dr. Eduardo Caballero
Fernando Cutire

Talleres Vespertinos

1:00 pm - 1:45 pm

1. ¿Cómo se puede mejorar la visibilidad en el Ranking Mundial.? (QS, GreenMetric)
2. ¿Cómo se puede mejorar la participación en redes de investigación locales como externas?
3. ¿Cómo aumentar la cantidad de resultados de investigaciones sobre temas medio ambientales y desarrollo sostenible que generan transferencia de conocimiento.?
4. ¿Cómo se puede multiplicar la cantidad de publicaciones enfocadas en temas medioambientales y desarrollo sostenible.?
5. ¿Cómo podemos implementar un Centro de Investigación en desarrollo sostenible.?
6. ¿Cómo se puede incrementar las actividades internas y eventos dirigidos a la comunidad sobre temas medioambientales.?

Para más información: direccion.investigacion@utp.ac.pa

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).

Revista de I+D TECNOLÓGICO

ISSN: 1680-8894
E-ISSN: 2219-6714

PRISMA TECNOLÓGICO

ISSN: 2076-8133
E-ISSN: 2312-637X

RIC REVISTA DE INICIACIÓN CIENTÍFICA
VOLUMEN DE UNDERGRADUATE RESEARCH

ISSN: 2412-0464
E-ISSN: 2413-6786

RETOS XXI

ISSN: 2524-1125
E-ISSN: 2524-1133

El Tecnológico

ISSN: 1819-9623
E-ISSN: 1819-9623

maga

ISSN: 1018-1563
E-ISSN: 1018-1563

2016

INTELIGENCIA AMBIENTAL, INGENIERÍA DE SOFTWARE Y SALUD ELECTRÓNICA & MÓVIL (InteSmart)

ISSN: 1018-1563
E-ISSN: 1018-1563

CONGRESOS CLABES

CONFERENCIA LATINOAMERICANA SOBRE ABANDONO EN LA EDUCACIÓN SUPERIOR

ISSN: 1018-1563
E-ISSN: 1018-1563

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 Central «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.