

TECNOLOGÍA en marcha

Revista trimestral
Enero– Marzo 2026
Volumen 39 Nº 1
ISSN-E 2215-3241

Publicación y directorio en catálogos

latindex redalyc.org UAEM Dialnet AmeliCA SciELO DOAJ

Editorial Tecnológica de Costa Rica

TEC | Tecnológico de Costa Rica

TECNOLOGÍA en marcha

Comisión Editorial
Felipe Abarca Fedullo. Director.
Editorial Tecnológica de Costa Rica

Juan Antonio Aguilar Garib
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León.
México

Carlos Andrés Arredondo Orozco
Facultad de Ingenierías
Universidad de Medellín. Colombia

Lars Köhler
Experimenteller Botanischer Garten
Georg-August-Universität Göttingen.
Alemania

Jorge Solano Jiménez
Instituto Costarricense del Cemento
y del Concreto

Edición técnica
Alexa Ramírez Vega

Revisión filológica
Esperanza Buitrago Poveda

Diseño gráfico
Felipe Abarca Fedullo

Diagramación
Alexa Ramírez Vega

Diseño de cubierta
Felipe Abarca Fedullo

Imagen de cubierta
https://www.pexels.com

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica de Costa Rica. - Vol. 39-1. Enero-Marzo, 2026 – Trimestral
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología – Publicaciones periódicas CDD:600

Editorial Tecnológica de Costa Rica
TEC | Tecnológico de Costa Rica

Apdo 159-7050 Cartago, Costa Rica
Tel.:(506) 2550-2297, 2550-2618
Correo electrónico: editorial@itcr.ac.cr
Web: https://www.tec.ac.cr/editorial
http://revistas.tec.ac.cr/tec_marcha

Editorial Tecnológica de Costa Rica

TEC | Tecnológico de Costa Rica

La Editorial Tecnológica de Costa Rica es una dependencia especializada del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Desde su creación, en 1978, se ha dedicado a la edición y publicación de obras en ciencia y tecnología. Las obras que se han editado abarcan distintos ámbitos respondiendo a la orientación general de la Institución.

Hasta el momento se han editado obras que abarcan distintos campos del conocimiento científico-tecnológico y han constituido aportes para los diferentes sectores de la comunidad nacional e internacional.

La principal motivación de la Editorial es recoger y difundir los conocimientos relevantes en ciencia y tecnología, llevándolos a los sectores de la comunidad que los requieren.

La revista *Tecnología en Marcha* es publicada por la Editorial Tecnológica de Costa Rica, con periodicidad trimestral. Su principal temática es la difusión de resultados de investigación en áreas de Ingeniería. El contenido de la revista está dirigido a investigadores, especialistas, docentes y estudiantes universitarios de todo el mundo.

Publicación y directorio en catálogos

redalyc.org UAEM

SciELO

latindex

AmeliCA

Dialnet

DOAJ DIRECTORY OF OPEN ACCESS JOURNALS

Revista trimestral
Enero-Marzo, 2026
Volumen 39-1
ISSN-E: 2215-3241

TECNOLOGÍA en marcha

Contenidos

Eficacia en la reducción de lignocelulosa, cafeína y taninos en cascarilla de café (*coffea arabica*) ensilada y agotada por *Pleurotus djamor*

Efficiency in reducing lignocellulose, caffeine and tannins in coffee husks (*Coffea arabica*) ensiled and depleted by *Pleurotus djamor*

José Alfonso López-García, Jacqueline Toledo-Roblero, Víctor Jesús Albores-Flores, María Guadalupe de Gyves-Córdova, José Arturo Oleta-Barrios, Julieta Grajales-Conesa 3

Diagnóstico predictivo de transformadores de potencia basado en análisis del aceite dieléctrico

Predictive diagnosis of power transformers through dielectric oil analysis

Juan José Montero-Jiménez, Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez, Fabricio Jorge Umaña-Blanco, Gabriel Andres Barrientos-Bravo, José Francisco Pérez-Guardiola 14

Propulsión bidireccional de nadadores de remo flexible

Bidirectional propulsion of flexible oar swimmers

Luis Felipe Córdoba-Ramírez 29

Análisis de dieciocho años de eventos de emergencias en Costa Rica: pérdidas, personas afectadas e indicadores asociados

Analysis of eighteen years of emergency events in Costa Rica: losses, affected people and associated indicators

Erick Mata-Abdelnour, Armando Briceño-Contreras 41

Evaluación preliminar de un sistema biológico eucariota (*Nicotiana tabacum*) escalable para la producción de insulina humana recombinante

Preliminary evaluation of a scalable eukaryotic biological system (*Nicotiana tabacum*) to produce recombinant human insulin

Carolina Centeno-Cerdas, Alina Jiménez-Rojas, Fabián Echeverría-Beirute, Montserrat Jarquín-Cordero 56

Estudio exploratorio para la minería electroquímica de magnesio en salmueras marinas de Abangares

Exploratory study for the electrochemical mining of magnesium in marine brines of Abangares

Monserrat Brenes-Granados, Jairo García-Céspedes, Diego González-Flores 74

Uso de estadísticos T^2 de Hotelling para detectar problemas de densidad en una espuma metálica

Use of Hotelling's T^2 Statistics to Detect Density Issues in a Metal Foam

Paula Solano-Leandro, Valeria Mayorga-Cervantes, Marcela Meneses-Guzmán, Bruno Chiné-Polito 91

Determinación de caudal ambiental para diferentes condiciones: una trayectoria de estudios de caso en Costa Rica

Environmental flow assessment under variable conditions: a series of case studies from Costa Rica

Laura Chavarría-Pizarro, Isabel Guzmán-Arias, Francisco Quesada-Alvarado, Valeria Serrano-Núñez, Fernando Watson-Hernández 104

Análisis espectroscópico de billetes poliméricos de la segunda serie de Costa Rica

Spectroscopic analysis of polymer banknotes from the second series of Costa Rica

James Andrés Ruiz-Vásquez, Ernesto Montero-Zeledón 116

Creación de una herramienta digital sobre casos no contemplados en la regulación oficial relacionados a diversos trámites para el registro de productos de interés sanitario

Development of a digital tool to address unregulated cases in various procedures for the registration of products of public health interest

Noelia Arce-Rodríguez, Sianny Corrales-Montero, Jorge Andrés Pacheco-Molina, Juan José Mora-Román 130

Diseño de un circuito de mitigación para mejorar la conmutación de MOSFETs en una configuración de medio puente H

Design of a mitigation circuit to improve MOSFET switching in a half-bridge configuration

Giancarlo Alvarado-Rivera, Ana Rebeca Fonseca-Huapaya, Yeiner Arias-Esquivel 149

Relaciones entre características morfológicas del fruto de cuayote (*Gonolobus edulis*)

Relations among morphological characteristics of the cuayote (*Gonolobus edulis*) fruit

José Eladio Monge-Pérez, Michelle Loría-Coto 160

Eficacia en la reducción de lignocelulosa, cafeína y taninos en cascarilla de café (*coffea arabica*) ensilada y agotada por *Pleurotus djamor*

Efficiency in reducing lignocellulose, caffeine and tannins in coffee husks (*Coffea arabica*) ensiled and depleted by *Pleurotus djamor*

José Alfonso López-García[1], Jacqueline Toledo-Roblero[2], Víctor Jesús Albores-Flores[3], María Guadalupe de Gyves-Córdova[4], José Arturo Oleta-Barrios[5], Julieta Grajales-Conesa[6]

Fecha de recepción: 18 de marzo, 2025
Fecha de aprobación: 16 de junio, 2025

López-García, J.A; Toledo-Roblero, J; Albores-Flores, V.J; de Gyves-Córdova, M.G; Oleta-Barrios, J.A; Grajales-Conesa, J. Eficacia en la reducción de lignocelulosa, cafeína y taninos en cascarilla de café (*coffea arabica*) ensilada y agotada por *Pleurotus djamor*. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 1. Enero-Marzo, 2026. Pág. 3-13.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i1.7855

1 Universidad Autónoma de Chiapas, Sistemas Alimentarios. Chiapas, México.
jose.lopez@unach.mx
https://orcid.org/0000-0001-8993-689X
2 Universidad Autónoma de Chiapas, Instituto de Biociencias. Chiapas, México.
jacqueline.toledo24@unach.mx
3 Universidad Autónoma de Chiapas, Sistemas Alimentarios. Chiapas, México.
victor.albores@unach.mx
https://orcid.org/0000-0003-1735-4510
4 Universidad Autónoma de Chiapas, Instituto de Biociencias. Chiapas, México.
maria.degyves@unach.mx
https://orcid.org/0000-0001-9713-2920
5 Universidad Autónoma de Chiapas, Sistemas Alimentarios. Chiapas, México.
jose.oleta@unach.mx
6 Universidad Autónoma de Chiapas, Sistemas Alimentarios. Chiapas, México.
julieta.grajales@unach.mx
https://orcid.org/0000-0002-1522-5646

Palabras clave

Cascarilla; café; ensilaje; agotamiento; sustrato; *Pleurotus djamor.*

Resumen

Introducción La cascarilla de café tiene limitaciones para su uso en la alimentación animal debido al contenido de taninos, cafeína y lignina, por lo cual se requiere de una bioconversión con microorganismos, como el ensilaje y agotamiento del sustrato con hongo que permiten la bioconversión de desechos lignocelulósicos. Objetivo: Evaluar la eficacia del ensilaje en cascarilla de café en la reducción del contenido de cafeína y taninos y la disminución de compuestos lignocelulolíticos por agotamiento del sustrato con *Pleurotus djamor.* Materiales y métodos: Se realizaron dos tratamientos de melaza para el ensilaje, melaza al 5% y 10%, se dejó por 160 días. Se tomaron muestras por triplicado para el análisis químico en el día 0 y al final del ensilado, se determinaron azúcares reductores, proteína, cenizas y fibra de acuerdo con procedimientos estandarizados, la celulosa por Kurschner y Hoffer, la lignina por TAPPI 222 om-88, taninos por el método de Folin Ciocalteu, basado en Makkar et al. Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial, se realizó ANOVA y prueba de Tukey para la comparación de medias, además del cálculo para determinar la eficacia de los tratamientos. Resultados: El proceso de ensilaje logró reducir significativamente la cafeína y los taninos para ambos tratamientos, la lignina se redujó un 55.87 y 43.97% respectivamente de cada tratamiento. Conclusiones: La bioconversión con *Pleurotus djamor* logró disminuir este compuesto, por lo que, la cascarilla de café se vuelve factible como suplementación animal.

Keywords

Husk; coffee; silage; exhaustion; substrate; *Pleurotus djamor*.

Abstract

Introduction. Coffee husks have limitations for their use in animal feed due to the content of tannins, caffeine and lignin, which requires bioconversion with microorganisms, such as silage and depletion of the substrate with fungi that allow the bioconversion of lignocellulosic waste. Objective. To evaluate the effectiveness of coffee husk silage in reducing the caffeine and tannin content and the decrease in lignocellulolytic compounds due to substrate depletion with *Pleurotus djamor*. Materials and methods. In this study, two treatments of molasses were carried out for silage, 5% and 10% molasses, left for 160 days. Samples were taken in triplicate for chemical analysis on day 0 and at the end of ensiling, reducing sugars were determined. , protein, ash and fiber according to standardized procedures, cellulose by Kurschner and Hoffer, lignin by TAPPI 222 om-88, tannins by the FolinCiocalteu method, based on Makkar et al. A completely randomized design with a factorial arrangement was used, ANOVA and Tukey's test were performed for the comparison of means, and calculations were also performed to determine the effectiveness of the treatments. Results. The silage process significantly reduced caffeine and tannins for both treatments, lignin was reduced by 55.87 and 43.97% respectively in each treatment. Conclusions. Bioconversion with *P. djamor* managed to reduce this compound, therefore, coffee husks become feasible as animal supplementation.

Introducción

La cascarilla de café es un residuo agroindustrial que puede ser utilizada como suplemento para bovinos, sin embargo, cuenta con un alto contenido de taninos, cafeína y lignina, estos compuestos disminuyen su aceptación por parte de estos animales, por lo que requiere de tratamientos previos, como el ensilaje y la degradación por hongos para eliminar los riesgos de toxicidad y disponibilidad de nutrientes absorbibles por los rumiantes [1].

El ensilaje es un pretratamiento para la cascarilla de café, el cual es llevado a cabo por un variado consorcio microbiano, fundamentalmente por bacterias ácido lácticas, cuyo metabolismo anaerobio produce compuestos que preservan la materia orgánica y mejora las cualidades nutricionales de esta [2]. Por lo que, la cascarilla de café es un sustrato adecuado para la fermentación ácido láctica, pero se requiere la adición de otros sustratos para estabilizar el proceso fermentativo [3] [4].

Los subproductos agroindustriales como el del trigo, cacao, café, caña, entre otros, cuentan con una elevada cantidad de nutrientes que pueden ayudar a la alimentación animal [5]. México es uno de los países productores de café, en 2022 se produjeron 1,025,034.80 toneladas, siendo el principal subproducto del procesamiento del café es la cascarilla, por lo que cada tonelada de café procesado, se producen 0.18 toneladas [3].

La cascarilla de café tiene limitaciones para su uso en la alimentación animal debido a su alto contenido de taninos y cafeína, sin embargo, se caracteriza por tener una alta concentración de fibra cruda, celulosa, proteína entre otros componentes y, en este sentido, son similares a otros subproductos que se utilizan como relleno en los alimentos para animales [6]. En general, la cantidad de componentes y los índices de la cascarilla de café varían según la especie de café, el origen geográfico de las cerezas y el método de procesamiento elegido [7] [8]. Además, la cáscara de café suele tener una alta porción de lignocelulosa que recubre la celulosa y la hemicelulosa, por lo cual se requiere de una bioconversión con microorganismos, lo que permite la digestión de nutrimentos y de materia seca para consumo animal [9].

Por otra parte, existen hongos que permiten la bioconversión de desechos lignocelulósicos en un bioproducto a través de sus actividades enzimáticas extracelulares [10]. *Pleurotus djamor* (*P. djamor*) es considerado como un eficiente descomponedor de la lignocelulosa, que es el principal polímero constituyente de los materiales lignocelulósicos. Esta especie se puede cultivar en un amplio espectro de materiales de desecho lignocelulósicos debido a su capacidad para secretar una variedad de enzimas degradativas [11] [12]. Por lo que el objetivo de este proyecto fue evaluar la eficacia del ensilaje de la cascarilla de café en la reducción del contenido de cafeína y taninos y la disminución de compuestos lignocelulolíticos por agotamiento del sustrato con *P. djamor*.

Materiales y métodos

Obtención del material biológico

La cascarilla de café se colectó en el “Beneficio de Café Torreón” el cual se ubica en el municipio de Tapachula, Chiapas; México (14°57´37´´N 92°15´06´´W). Se realizó una selección de cascarilla libre de moho o cualquier residuo ajeno a la cascarilla.

Preparación del ensilado

La obtención del material fue de acuerdo a la norma ISO 10725: Planes y procedimientos de muestreo de aceptación para la inspección de materiales a granel [13]. La preparación se llevó a cabo en “Beneficio de Café Torreón”, se tomaron 20 kilos de cascarilla, se dividieron en dos

partes iguales adicionando melaza al 5% y 10% respectivamente, la cascarilla fue tendida sobre una superficie plana y limpia, se extendió en forma de círculo, dejando un grosor uniforme de 20 cm, se hicieron huecos y se fue homogeneizando con su respectiva cantidad de melaza, después de ello se colocó en bolsas de color negro con 2 kg cada una respectivamente, al término del llenado se realizó la compactación para extraer la mayor cantidad de aire posible [14]. Las bolsas fueron almacenadas en una bodega para evitar la exposición solar, hasta alcanzar 160 días.

Análisis fisico-químicos

Se realizaron los análisis fisicoquímicos en la cascarilla de café al inicio del ensilaje, después de completar los 160 días y al término del agotamiento del sustrato con *P. djamor.*

La determinación del contenido de cenizas, se realizó de acuerdo con procedimientos estandarizados [15] la celulosa, se determinó de acuerdo con método Kurschner y Hoffer [16] y la lignina, se evaluó de acuerdo con lo propuesto por TAPPI 222 om-88[17] .

La cuantificación de azúcares reductores fue determinada de acuerdo a la NOM-086-SSA1-1994 Inciso 2.1 [18] .

La cafeína se determinó por el método de Sánchez, A [19] con modificaciones a la metodología, donde se pesaron 10 g de cascarilla de café y se agregaron 150 ml de agua destilada en un vaso de precipitado, y posterior fue llevado a ebullición, esto con la finalidad de extraer la cafeína contenida en la muestra y se siguió con la metodología ya descrita. La extracción de los taninos, se utilizó el método oficial de la AOAC 2014, para taninos.

Para la determinación de taninos, se siguió el método de Folin Ciocalteu, basado en Makkar et al [20], se determinó fenoles totales de la muestra y posterior los taninos totales, a partir de los resultados anteriores, el contenido de taninos de la muestra se calculó de la siguiente manera: Fenólicos totales (%) – Fenólicos no taninos (%) = Taninos (%).

Se determinó la proteína total siguiendo el método descrito por Bradford [21].

Inoculación del hongo

El hongo utilizado fue *P. djamor*, se obtuvo comercialmente los cuales venían inoculados en semillas de *Sorghum bicolor* (L.) Moench, se ajustó el pH de la cascarilla de café previamente fermentada por 160 días, con una solución sobresaturada de Ca $(OH)_2$, hasta llegar a 6.5 de pH. Fueron inoculados 100 g de semillas colonizadas por el micelio en bolsas con 2 kg de cascarilla fermentada, 2 días después de la inoculación se perforaron las bolsas para permitir el intercambio de gases y la formación de tallos germinativos del cuerpo fructífero [22].

Diseño experimental

El experimento fue desarrollado bajo un diseño completamente al azar con arreglo bifactorial 2x2, con tres replicaciones, los tratamientos se realizaron de la siguiente manera: melaza al 5% y melaza al 10%, con el cultivo de *P. djamor y* sin el cultivo de este hongo que fue el tratamiento testigo.

Análisis estadístico

Los datos fueron sometidos al análisis de la varianza (ANOVA) seguida de una prueba de comparación de medias (Tukey $p \leq 0.05$) con ayuda del programa INFOSTAT®.

Resultados y Discusión

Composición química de la cascarilla de café sin ensilar

Los azúcares reductores de la cascarilla de café con melaza al 5% sin ensilar fue de 3.4E-05mg/mL (±1.0E-06) mientras que el tratamiento con 10% resultó de 0.01mg/mL (±6.3E-04) resultando significativamente diferentes entre ambos tratamientos. En el cuadro 1 se observó la composición química de la cascarilla de café sin ensilar, [23] reportó una concentración de 0.66 mg/mL, [24] obtuvieron 1.43mg/mL, las diferentes concentraciones en cascarilla de café puede depender de las variedades y la ubicación geográfica, incluso de las condiciones de cultivo y los recursos en la región de producción.

La concentración inicial de la cafeína es similar reportada por otros autores [25] cuya concentración fue de 1.3%, aun con esta concentración puede provocar un efecto fisiológico en los rumiante, el cual al ser una purina metilada provoca un aumento en la actividad motora que causa decenso en la ganancia de peso y conversión, aumenta la sed de los animales y el reflejo urinario dando como consecuencia la excreción de nitrógeno y hay que recordar que el ciclo de la urea en el metabolismo del rumiante incluye que la molecula llegue a la saliva y mantenga la población de microorganismos que utilizan urea. Por otro lado, los fenoles libres, básicamente el ácido clorogénico y caféico pueden interferir con la utilización de proteínas y enzimas y afectar el catabolismo, al combinarse con el hierro y formar complejos insolubles que dificultan su asimilación en el intestino [28]. La absorción de las proteínas puede verse afectada al unirse a los fenoles libres y afectar su absorción en el intestino delgado. Los taninos tienen una alta capacidad de ligarse a las proteínas y actuar como inhibidores enzimáticos. Sin embargo, estos compuestos se reducen de los residuos de café después de haber sido ensilados [28].

La cantidad de taninos oscila entre 4.5 y 5% repostado por otros autores [25], esto difiere con los resultados obtenidos con valores entre 1.06 a 1.73%, una de las principales características de los taninos, es su capacidad de ligar las proteínas, evitando su absorción en el organismo y su aprovechamiento final, disminuyendo de esta manera la disponibilidad biológica de este nutriente y por otro lado, adicional a la fermentación láctica anaerobia del residuo de café se agotó el sustrato durante el desarrollo del hongo por lo cual se logró la disminución de estos compuestos. [35] ha reportado que el efecto de la cafeína sobre los procesos metabólicos en el rumen que muestran que dosis bajas de cafeína (50 ppm) incrementó la digestibilidad de materia seca y almidón, mientras que la cantidad en el número de protozarios y amonio se reducen lo cual está relacionado con el metabolismo de las proteínas. Sin embargo, dosis mayores de cafeína tienen un impacto negativo sobre los parámetros mencionados.

Los porcentajes para celulosa de ambos tratamientos fueron mayores a comparación de [26] quienes obtuvieron concentraciones de 35.40%, mientras que para el caso de lignina [27] reportó valores menores de 27.14%. [28] reporto concentraciones de lignina de 20.70%. Existen diferencias en las concentraciones debido a las condiciones agroecológicas de las zonas de producción, variedad y manejo del cultivo, las cuales influyen directamente en la composición bromatológica de la cascarilla.

El contenido de proteína fue menor a lo reportado por [29] que fue de 10.36%, así mismo [30] reporta valores entre 8 y 11% de contenido en cascarilla de café.

El contenido de ceniza es similar a lo reportado por [31] que fue de 2.50% y [32] con 7.85%.

En el contenido de fibra cruda fue mayor a comparación de [33] que obtuvo 11.52%. [30] encontró valores de 62.1%, mientras que [34] encontró valores de 24% y 43%.

Cuadro 1. Composición química de la cascarilla de café sin ensilar.

Tratamiento	Cafeína	Taninos	Celulosa	Lignina	Proteína	Ceniza	Fibra cruda
Melaza 5%	1.56±0.16^{A}	1.73±0.02^{A}	42.70±1.83^{B}	78.53%±1.8^{B}	1.52±0.00^{A}	2.32±0.11^{A}	35.33±1.00^{A}
Melaza 10%	1.47±0.04^{A}	1.06±0.04^{A}	18.17±0.99^{A}	61.57±0.47^{A}	1.52±0.28^{A}	5.01±0.10^{B}	35.32±0.12^{A}

^{AB} Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p<0.05).

Composición química de la cascarilla de café ensilada

Los azúcares reductores en el caso de melaza al 5% fue de 8.1E-0.5 mg/g (±6.7E-06) ^{A} y con melaza al 10% fue de 1.9E-03 mg/g (±6.6E-04) $^{B.}$, en comparación con otros autores [34] que obtuvieron una concentración de 6.27%.

La composición química de la cascarilla de café ensilada por 160 días se muestra en el cuadro 2, la concentración de cafeína fue similar a lo reportado por [11] que fue de 0.2%, mientras que [4] reportó 1.3% en pulpa de café. La presencia de cafeína disminuye despues del prcoeso de ensilaje debido a la solubilización y metabolización por parte de bacterias ácido lácticas [35].

El contenido de taninos fue similar con lo reportado por [11] que fue de 0.18%, [36] encontraron valores entre 1.80% a 8.56%. mientras que otros autores reportan rangos de 0.29 y 0.70% [34]. El alto contenido de taninos reduce la digestibilidad de las proteínas y de otros componentes de la dieta, por lo que, las tasas de inclusión no deben exceder el 2.5%, aunque algunos animales toleran altas cantidades de este compuesto, otros son más sensibles como es el caso de los rumiantes, por lo que se pueden beneficiar del tratamiento de ensilaje [37].

Para la concentración de celulosa no hubo un incremento significativo entre el inicio del ensilaje inicial y al final de este, lo mismo reportaron [38] teniendo un valor inicial de 19.50% y final del 28.25%. Se presume que el hecho de tener la cascarilla de café por tanto tiempo fermentado estimula la actividad de las reacciones enzimáticas que pueden convertirlas en sustancias inocuas o de afectar la disponibilidad de las proteínas u otros compuestos de interés en la alimentación.

El proceso de ensilaje logró disminuir el contenido de lignina, que alcanzó el 55.87 % con melaza al 5% y 43.97% con melaza al 10%, de igual manera en estudios previos, se observó una disminución del 33.63 % [34].

El ensilaje aumentó el contenido de proteína a 1.87 y 2.16% en ambos tratamientos. Sin embargo, estos valores fueron inferiores a los reportados por [39] [37] quienes obtuvieron 12.5 y 15.5% de proteína, esto puede deberse a la síntesis que producen las bacterias en el ensilaje, generando un aumento en los niveles de proteína soluble y degradada.

Se detectaron valores de cenizas de ambos tratamientos estadísticamente similares, a diferencia de otros estudios donde reportan un 22.12 % a los 120 días de ensilaje, particularmente una característica deseable en un alimento es que disponga de alto contenido de ceniza para que pueda proporcionar niveles apropiados de minerales necesarios en las dietas para animales [39].

La fibra cruda fue mayor a lo reportado por [36] obteniendo 20.8%, [32] obtuvieron 27.17%, esto se debe probablemente a la concentración de compuestos fenólicos en los granos de café, así como a la presencia de otros compuestos formados por la reacción de Maillard. durante el proceso de tostado, como las melanoidinas.

Una de las características de la cascarilla de café es la gran cantidad de fibra que contiene, definida como la biomasa vegetal que se resiste a la hidrólisis del tracto digestivo de los individuos por lo que el proceso de ensilaje y posterior agotamiento por hongos comestibles reduce significativamente la cantidad de fibra. (45) obtuvieron valores para cascarilla de café sin ensilar de fibra cruda 12%, fibra detergente neutra hasta 83.6%, celulosa 24.5%, hemicelulosa 29.7% y lignina 23.7%. Estos valores deben disminuir por la degradación microbiana durante el ensilaje y agotamiento por pleutorus, convirtiendo estos carbohidratos estructurales en azúcares solubles como se pudo observar en el trabajo donde aumenta la catidad de azúcares reductores totales.

Cuadro 2. Composición de la cascarilla de café ensilada por 160 días.

Tratamiento	Cafeína	Taninos	Celulosa	Lignina	Proteína	Ceniza	Fibra cruda
Melaza 5%	0.16 ± 0.01^{A}	0.21 ± 0.03^{B}	40.77 ± 0.47^{B}	55.87 ± 1.12^{B}	1.87 ± 0.05^{A}	2.51 ± 0.05^{A}	47.83 ± 6.62^{A}
Melaza 10%	0.17 ± 0.01^{B}	0.06 ± 0.02^{A}	26.07 ± 1.52^{A}	43.97 ± 1.01^{A}	2.16 ± 0.05^{B}	3.48 ± 0.96^{A}	47.83 ± 3.21^{A}

^{AB} Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p<0.05$).

Composición química con agotamiento del sustrato con *Pleurotus djamor*

Como se observa en el cuadro 3, los azúcares reductores aumentaron, lo que quiere decir que, *P. djamor* logró convertir la lignina en azucares simples. [40] encontraron que al cultivarlo en paja de arroz se presentó pérdidas continuas en el contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina, carbono y nitrógeno totales, desde su inoculación hasta la cosecha de los basidiomas, mientras que el contenido de azúcares libres, cenizas y relación C/N se incrementaba, caso contrario de [41] teniendo una pérdida de fibra entre 31 al 40% al final del ciclo de cultivo, decreciendo la fracción de celulosa entre 35 a 48%.

Al inicio del ensilaje se tenía una baja concentración de proteína, la cual *P. djamor* logró incrementar, esto se debe a que tienen la capacidad de producir biomasa con mayor contenido de nitrógeno que el sustrato en el que están creciendo [40].

En el tratamiento testigo, el micelio no colonizó completamente el sustrato, esto se debió a la alta concentración de cafeína, [41] informó que este compuesto inhibe el crecimiento micelial. [42] además de la baja relación C/N del sustrato, lo cual no es adecuada para los requisitos del hongo.

(41) reportaron un retraso en sus tratamientos, debido a la ausencia del proceso de ensilaje, lo cual el sustrato presentaba un alto contenido de lignina, siendo está, un polímero complejo que forma una barrera que impide que el hongo ataque otros polisacáridos; por lo que primero debe degradarse para permitir el acceso a la holocelulosa en la pared celular del material vegetal, a consecuencia de esto, el crecimiento es más lento.

(45) reporta que los hongos superiores como *Pleurotus oestratus* tiene la habilidad de biotransformar los materiales lignocelúsicos a través de las actividades enzimáticas extracelulares. A nivel ruminal no encontraron enfectos en el pH y la producción de nitrógenos amoniacal pero si disminuyó la producción de ácidos grasos volátiles y la digestibilidad de la materia seca conforme se aumentó el nivel de cascarilla de café, así como la población ruminal de protozoarios también fue menor que en las dietas testigo.

Cuadro 3. Composición química con agotamiento del sustrato con *Pleurotus djamor.*

	Azúcares reductores	Proteína	Ceniza	Fibra cruda
Sustrato agotado con *P. djamor*	2.36±0.85	5.45±0.23	11.40±1.19	10.66±1.16

En la figura 1, se muestra el proceso de cultivo del hongo *P. djamor* en cascarilla de café, el cual duró 20 días.



Figura 1. Proceso de cultivo del hongo *P. djamor* cultivado en cascarilla de café.

Conclusiones

El ensilaje es un método efectivo para la disminución y/o eliminación de compuestos potencialmente tóxicos, como lo es la cafeína y los taninos en la cascarilla de café. Adiconalmente, el cultivo del hongo *Pleurotus djamor* en el ensilado de cascarillad de café como sustrato disminuye efectivamente la presencia de cafeína, taninos y lignina, por lo cual hace disponible los nutrientes contenidos en la cascarilla de café, para su uso en la suplementación animal.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Politécnica de Tapachula y a la Asociación Ganadera Local General de Tapachula A.C por el apoyo económico y de infraestructura proporcionada.

Referencias

[1] A. Wogderess, "Available information on the feeding value of coffee waste and ways to improve coffee waste for animal feed" African Journal of Biology, vol. 3, no 6, pp. 243-257. 2016

[2] C. Perraud-Gaime. "Evolution of Physico-Chemical and Microbiological Parameters During Large-Scale Coffee-Pulp Silage" Waste and Biomass Valorization, vol. 12, pp. 6057–6065. 2021

[3] A. T. Márquez-Araque. "Algunas aplicaciones de la biotecnología en nutrición de rumiantes". Agroindustria, Sociedad y Ambiente, I, Vol. 14, pp. 125-157. 2020.

[4] A. Cerda, L. Mejías, T. Gea, A. Sánchez. "Cellulase and xylanase production at pilot scale by solid-state fermentation from coffee husk using specialized consortia: The consistency of the process and the microbial communities involved". Agricultural Wastes, vol. 243, pp. 1059-1068. 2017.

[5] Milawarni, Arskadius, Elfiana, Yassir. "Characteristics of wafer originated from coffee waste as ruminant animal feed", in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, pp. 1-6.

[6] E. Manals-Coutiño, D. Salas-Tort, M. Penedo. "Caracterización de la biomasa vegetal "cascarilla de café". Tecnología Química, vol. 38, pp. 6-12. 2017.

[7] L. Oliveira, A. Franco. "An overview of the potential uses for coffee husks". In Coffee in health and disease prevention, Academic Press, pp. 283-291, 2015.

[8] S. Fornito, F. Puliga, P. Leonardi, M. Di Foggia, A. Zambonelli, O. Franco. "Degradative ability of mushrooms cultivated on corn silage digestate". Molecules, vol. 25, pp. 1-15. 2020.

[9] J. Li, X. Yuan, Z. Dong, W. Mugabe, T. Shao. "The effects of fibrolytic enzymes, cellulolytic fungi and bacteria on the fermentation characteristics, structural carbohydrates degradation, and enzymatic conversion yields of *Pennisetum sinese* silage". Bioresource Technology, vol. 264, pp. 123-130. 2018.

[10] I. Badarinaa, D. Evvyernieb, T. Toharmatb, E. Herliyanac, L. Darusmand. "Nutritive Value of Coffee Husk Fermented with *Pleurotus ostreatus* as ruminant feed". Journal of Animal Science and Technology, vol. 36, pp. 58-63, 2013.

[11] M. Nunes, M. Da Silva, J. Schram, J. Da Silva, Y. Tamai, M. Kasuya. "*Pleurotus ostreatus*, mushrooms production using quick and cheap methods and the challenges to the use of coffee husk as substrate". African Journal of Microbiology Research, vol. 11, pp. 1252-1258. 2017.

[12] B. Chala, H. Oechsner, J. Müller. "Introducing temperature as variable parameter into kinetic models for anaerobic fermentation of coffee husk, pulp and mucilage". Applied sciencies, vol. 9, pp. 1-10. 2019.

[13] Procedimientos y planes de muestreo de aceptación para la inspección de materiales a granel. Norma técnica NTP-ISO 10725 peruana 2009. Comisión de Normalización y Fiscalización de Barreras Comerciales no arancelarias-INDECOPI, 30 de septiembre de 2009.

[14] A. Aguilar, A. Esteban. "Producción del hongo ostra *Pleurotus ostreatus* a partir de residuos de café (*Coffea arábica*). BS Thesis, Universidad Católica de Cuencia, 2022.

[15] NMX. Norma Mexicana NMX-AA-18-1984. (online) Available at http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa018.pdf

[16] K. Kurschner, A. Hoffer. "Cellulose and cellulose derivative, Fresenius". Journal of Analytical Chemistry, vol. 92, pp. 145-154. 1993.

[17] T. TAPPI. 264 cm-07. Preparation of wood for chemical analysis. Technical Association of the Pulp and Paper Industry. 2007

[18] R. Arias-Ortíz, J. Meneses. "Caracterización físico-química de residuos agroindustriales (cascarilla de arroz y cascarilla de café), como materia prima potencial para la obtención de bioetanol". BS Thesis. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua. 2016.

[19] F. Sánchez-Rojas, C. Bosh-Ojeda, J. Cano-Pavón. "Derivative ultraviolet-visible region absorption spectrophotometry and its analytical application". Talanta, Vol. 35, pp. 753-761. 1998.

[20] H. Makkar, M. Blummel, N. Borowy, K. Becker, K. "Gravimetric determination of tannins and their correlations with chemical and protein precipitation methods". Journal of the food science and agriculture, vol. 61, pp. 161–165. 1993.

[21] A. Dougha. “A Comparative bioconversión of yam peles by *Aspergillus niger* and *Pleurotus ostreatus* into improved animal feed” BS Thesis, Kwane Nkrumah University of Science and Technology. 2017.

[22] O.A. F. Montes. Manual de cultivo de hongo oseta (*Pleorotus ostreatus*) de forma artesanal. BS Thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 2012.

[23] L. Qin, W. Li, J. Zhu, B. Li, Y. Yuan. “Hydrolysis of Lignocellulosic Biomass to Sugars. In: Fang, Z., Smith, Jr., R., Qi, X. (eds) Production of Platform Chemicals from Sustainable Resources. Biofuels and Biorefineries. Springer, Singapore. 2017.

[24] S. Swaroop, S. Abdulhameed. “Coffee Husk: A Potential Agro-Industrial Residue for Bioprocess”. Chapter 6. Thalassery Campus, Kannur, India. 2018.

[25] S. Collazo-Bigliardi, R. Ortega-Toro, A. Chiralt Boix. “Isolation and characterization of microcrystalline cellulose and cellulose nanocrystals from coffee husk and comparative study with rice husk”. Carbohydrate Polymers, vol. 191, ppf. 205-215. 2018.

[26] B. Gonçalves, M. Camillo, M. Oliveira, L. Carreira, J. Moulin, F. Neto, et al. “Surface Treatments of Coffee Husk Fiber Waste for Effective Incorporation into Polymer Biocomposites”. Polymers, vol. 13. 2021.

[27] M. Hoseini, S. Cocco, C. Casucci, V. Cardelli, G. Corti. “Coffee by-products derived resources. A review”. Biomass and Bioenergy, vol. 148. 2021.

[28] Noriega S, Silva, R, García S, M. “Utilización de la pupla d café en la alimentación animal”. Zootecnia Tropical, vol. 26 n.4, pp. 411-419. 2008.

[29] Noriega, S, Silva, R, García S, M. “Composición química de la pulpa de café a diferentes tiempos de ensilaje para su uso potencial en la alimentación animal”. Zootecnia Tropical, vol. 27, pp. 135-141. 2009.

[30] A. Skibba-Wogderess. “Available information on the feeding value of coffee”. African Journal of Biology, vol. 3, pp. 243-257. 2016.

[31] C. Mhilu. “Analysis of Energy Characteristics of Rice and Coffee Husks Blends”. International Scholarly Research Notices, pp. 1–6. 2014

[32] A. Dinata, J. Utami. “Nutrient content of coffee berries husk fermented with different inoculants”. IOP Conference Series: Earth Environmental Science, 387. 2019.

[33] A. Hernández. “Estudio de la fermentación en medio solido con *Aspergillus niger* en un reactor semi- piloto”. M. S. Thesis, Tecnológico Nacional de Orizaba, Veracruz, Mexico. 2017.

[34] A. Farah. “Coffee as a specialty and functional beverage”. In: Functional and Speciality Beverage Technology. Paquin, P. (Ed.). Woodhead Publishing Limited. 370–395 pp. 2009.

[35] Toledo, M, Hussein, S, Peña, M, Aguerre, M, Bridges,W, Lascano, G. “Effects of Caffeine Doses on Rumen Fermentation Profile and Nutrient Digestibility Using a Lactating Cow Diet under Continuous Cultures Conditions”. *Ruminants* 2024, *4*(3), 406-417; https://doi.org/10.3390/ruminants4030029

[36] J. Raman, K. Jang, Y. Oh, M. Oh, J. Im, H. Lakshmanan, H., V. Sabaratnam. “Cultivation and Nutritional Value of Prominent *Pleurotus spp.*: An Overview”. Mycobiology, Vol. 49, pp. 1-14. 2020.

[37] M. Paulo. “Degradation of caffeine by mycroorganisms and potential use of decaffeinated coffee husk and Pulp in animal feeding”. Scientia Agricola., vol. 59, pp. 815-821. 2002.

[38] E. Oropeza-Mariano, M. Ortega-Cerrilla, J. Herrera-Haro, E. Ramírez-Bribiesca, T. Salinas-Ríos. “Use of pulp and husk of coffee in animal feed”. Agro Productividad, vol. 15, pp. 149-158. 2022.

[39] P. Aguirre-Fernández, L. Acosta-Pinto, L. Cardozo-Corzo, S. Rodríguez-Arenas, G. Corredor-Sánchez. “Nutritional evaluation of silage with coffee (*Coffea arabica* L.) cherry for ruminant supplementation”. Acta Agronómica, vol. 67, pp. 326-332. 2018.

[40] F. Ramón, G. Páez, M. Chirinos, Z. Mármol. “Ensilaje de la Pulpa de Café”. Revista de la Facultad de Agronomía, vol. 12, pp. 417-428. 1995.

[41] D. Salmones. “*Pleurotus djamor*, un hongo con potencial aplicación biotecnológica para el neotrópico”. Scientia Fungorum, vol. 46, pp. 73-85. 2017.

[42] A. Kivaisi, F. Magingo, B. Mamiro. “Performance of *Pleurotus flabellatus* on water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) shoots at two different temperature and relative humidity regimes”. Tanzania Journal Science, vol. 29, pp. 11-18. 2003.

[43] R. Campos-Vega, G. Loarca-Piña, H. Vergara-Castañeda, B. Oomah. “Posos de café gastados: una revisión de la investigación actual y perspectivas futuras”. Tendencias en ciencia y tecnología de los alimentos, vol. 45, pp. 24-36. 2015.

[44] C. Carrasco-Cabrera, T. Bell, M. Kertesz. “Metabolismo de la cafeína durante el cultivo del hongo ostra (*Pleurotus ostreatus*) con posos de café”. Microbiología y biotecnología aplicadas, vol. 103, pp. 5831-5841. 2019.

[45] Badarinaa I*, Evvyernieb D, Toharmatb, T, Herliyanac EN, & Darusmand, LK (2013). Nutritive Value of coffee husk fermentated with Pelurotus ouestratus as ruminant feed”. Media Petermakan. April pp.5863 medpet.journal.ipb.ac.id/ DOI: 10.5398/medpet.2013.36.1.58

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Diagnóstico predictivo de transformadores de potencia basado en análisis del aceite dieléctrico

Predictive diagnosis of power transformers through dielectric oil analysis

Juan José Montero-Jiménez[1], Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez[2], Fabricio Jorge Umaña-Blanco[3], Gabriel Andres Barrientos-Bravo[4], José Francisco Pérez-Guardiola[5]

Fecha de recepción: 25 de marzo, 2025
Fecha de aprobación: 3 de julio, 2025

Montero-Jiménez, J.J; Gómez-Ramírez, G.A; Umaña-Blanco, F.J; Barrientos-Bravo, G.A; Pérez-Guardiola, J.F. Diagnóstico predictivo de transformadores de potencia basado en análisis del aceite dieléctrico. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 1. Enero-Marzo, 2026. Pág. 14-28.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i1.7861

1 Escuela de Ingeniería en Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
juan.montero@itcr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0002-3215-3736
2 Escuela de Ingeniería en Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
ggomez@itcr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0001-9195-072X
3 Escuela de Ingeniería en Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
fabriciouma@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0001-0111-5200
4 Escuela de Ingeniería en Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
gbarrientos@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0006-5566-3428
5 Escuela de Ingeniería en Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
josefran.perez@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0007-7781-612X

Palabras clave

Transformadores de potencia; análisis de gases disueltos; métodos de análisis al aceite; mantenimiento predictivo; análisis de fallas en transformadores; aceite dieléctrico; monitoreo de transformadores.

Resumen

El presente estudio analiza la condición del aceite dieléctrico en transformadores de potencia con el propósito de detectar fallas internas que puedan afectar su operatividad. La problemática principal se centra en el deterioro del aceite y su influencia en el aislamiento eléctrico, lo que puede derivar en la aparición de descargas parciales o fallas térmicas de alta gravedad. Para abordar esta cuestión, se emplearon diversos métodos de diagnóstico, tales como Dornenburg, Triángulo de Duval y Rogers, complementados con el análisis de gases disueltos y propiedades fisicoquímicas del aceite. La metodología consistió en el análisis de diez muestras de aceite, evaluando la concentración de gases como acetileno, etileno, monóxido y dióxido de carbono, así como parámetros fisicoquímicos tales como rigidez dieléctrica, factor de potencia y contenido de agua. Los resultados revelaron que algunas muestras presentan indicios de descargas parciales o de baja energía, mientras que otras evidencian fallas térmicas severas o descargas de alta energía. La concordancia entre los diferentes métodos empleados respalda la confiabilidad del diagnóstico y pone de manifiesto la presencia de una degradación significativa en determinados transformadores.

Keywords

Power transformers; dissolved gas analysis; oil analysis methods; predictive maintenance; transformer failure analysis; dielectric oil; transformer monitoring.

Abstract

This study examines the state of dielectric oil in power transformers to identify internal problems that could impact their functionality. The primary issue is the degradation of the oil and its impact on electrical insulation, perhaps resulting in partial discharges or severe thermal failures. To resolve this issue, multiple diagnostic techniques were employed, including Dornenburg, Duval Triangle, and Rogers, alongside the examination of dissolved gases and the physical and chemical features of the oil. The methodology involved analyzing ten oil samples to assess the concentrations of gases including acetylene, ethylene, carbon monoxide, and carbon dioxide, along with physicochemical properties such as dielectric strength, power factor, and water content. The results suggested that certain samples reveal indications of partial or low-energy discharges, whilst others demonstrate significant thermal flaws or high-energy discharges. The concordance among the various methodologies employed corroborates the diagnostic reliability and indicates substantial deterioration in specific transformers.

Introducción

El sistema dieléctrico de un transformador es un componente esencial para garantizar su funcionamiento seguro y eficiente [1]. Este sistema, conformado principalmente por el aceite dieléctrico y materiales aislantes sólidos, cumple funciones críticas como el aislamiento eléctrico, la disipación del calor generado durante la operación y la protección de los componentes

internos frente a contaminantes externos y procesos de deterioro. La preservación de su integridad es fundamental, ya que cualquier degradación puede derivar en fallas severas, interrupciones en el suministro eléctrico y elevados costos de reparación.

El aceite dieléctrico desempeña un papel vital en el sistema aislante al proporcionar tanto aislamiento eléctrico como refrigeración [2]. Su monitoreo constante mediante pruebas específicas es indispensable para evaluar su estado y prevenir fallas. Ensayos como la rigidez dieléctrica, el factor de potencia, la resistividad y la apariencia visual permiten identificar la presencia de contaminantes como agua, partículas conductivas y productos químicos degradados. Estos análisis posibilitan la detección temprana de problemas que, si no se abordan, podrían comprometer seriamente el desempeño del transformador.

La cromatografía de gases disueltos constituye una herramienta avanzada para evaluar el estado interno del transformador [3]. Este método identifica y cuantifica gases generados por procesos de degradación térmica o eléctrica en el aceite y el papel aislante, como hidrógeno, metano, acetileno y dióxido de carbono. La capacidad de este análisis para diagnosticar fallas incipientes, tales como descargas parciales, sobrecalentamientos o arcos eléctricos, lo convierte en un componente esencial del mantenimiento predictivo, ya que permite prevenir problemas mayores y prolongar la vida útil del transformador.

Para interpretar los resultados obtenidos en la cromatografía de gases, se emplean herramientas como el Triángulo de Duval [4]- [5], el Método del Gas Característico [6], las Relaciones de Dornenburg [7] y las Relaciones de Rogers [8]. Estas metodologías, utilizadas de manera complementaria, permiten clasificar las fallas en térmicas, eléctricas o combinadas. El Triángulo de Duval es una técnica gráfica que ofrece una representación visual sencilla y precisa, mientras que los métodos de relaciones proporcionan un análisis más detallado de las proporciones de gases.

El sistema dieléctrico del transformador es un pilar fundamental para su confiabilidad y seguridad operativa [9]. Las pruebas realizadas al aceite dieléctrico, la cromatografía de gases y los métodos de análisis son herramientas indispensables para garantizar un diagnóstico completo, detectar fallas en etapas tempranas y optimizar las estrategias de mantenimiento [10]. La integración de estas técnicas no solo reduce los costos operativos, sino que también maximiza la eficiencia y asegura la continuidad del suministro eléctrico.

Es importante mencionar que el análisis del sistema dieléctrico de transformadores de potencia ya es un tema que se estudia desde hace varias décadas y que, para lograr una estandarización en las pruebas al sistema dieléctrico de un transformador de potencia, existen múltiples normas que ofrecen una guía sobre el análisis del sistema dieléctrico de los transformadores de potencia, como por ejemplo [11] y [12]. Las normas demuestran el rigor técnico que se sigue en el análisis del sistema dieléctrico de un transformador de potencia a nivel profesional. A nivel académico, existen diferentes iniciativas que combinan métodos tradicionales con nuevas tendencias de algoritmos avanzados de análisis e inteligencia artificial [13].

Un ejemplo de esto se encuentra en [14], donde se presenta un algoritmo de aprendizaje profundo para la gestión de salud de transformadores de potencia. Otro ejemplo es [15] que presenta un algoritmo de aprendizaje de máquina para el mejoramiento de la interpretación de análisis de gases disueltos en el aceite de un transformador para su debido diagnóstico. Es importante mencionar que estas iniciativas buscan simplificar y mejorar el diagnóstico de transformadores, comparado con las herramientas tradicionales que podrían ser no concluyentes por si solas. Sin embargo, las herramientas tradicionales continúan siendo la base de diagnóstico normada a nivel profesional.

El presente artículo pretende mostrar con ejemplos prácticos reales los fundamentos del diagnóstico del sistema dieléctrico de transformadores de potencia utilizando registros de pruebas al aceite dieléctrico y de pruebas de gases disueltos a través de cromatografía. Una introducción técnica a cada tipo de pruebas es presentada en la sección materiales y métodos. Posteriormente se presentan los fundamentos de tres de los métodos tradicionales de detección de fallas: triángulo de Duval, relaciones de Dornenburg y relaciones de Rogers. Utilizando un caso de estudio con registros reales de pruebas al sistema dieléctrico a transformadores de potencia se realiza un análisis utilizando cada método antes mencionado y se muestran los resultados. El objetivo es darle al lector un resumen introductorio al diagnóstico del sistema dieléctrico de transformadores de potencia utilizando técnicas tradicionales y datos reales de transformadores.

Análisis al Sistema Dieléctrico de los Transformadores de Potencia

Pruebas al aceite dieléctrico de los transformadores

El análisis de las propiedades físicas, químicas y dieléctricas del aceite aislante constituye un proceso crucial para asegurar la operatividad confiable y la seguridad de los transformadores eléctricos. Este fluido desempeña un rol esencial tanto en el aislamiento eléctrico como en la disipación del calor generado durante la operación. Mediante este tipo de evaluaciones, se pueden determinar parámetros fundamentales, como el *contenido de agua, número de neutralización ácido, rigidez dieléctrica, factor de potencia, resistividad, apariencia visual, color, tensión interfacial y la gravedad específica* que afectan directamente el rendimiento del equipo.

El cuadro 1 muestra las principales evaluaciones pruebas y ensayos a los aceites dieléctricos empleados en transformadores, dividiéndolas en tres categorías fundamentales: físicas, químicas y dieléctricas. Asimismo, se detallan las normativas internacionales aplicables a cada prueba, incluyendo estándares reconocidos como ASTM, IEC e ISO. Las pruebas físicas abarcan análisis como la apariencia visual, el color, la tensión interfacial y la gravedad específica, enfocándose en las características externas y la densidad del aceite. Por otro lado, las pruebas químicas, como el contenido de agua y el número de neutralización ácido, permiten identificar contaminantes y productos de degradación química. Finalmente, las pruebas dieléctricas, entre las que se incluyen la rigidez dieléctrica, el factor de potencia y la resistividad, evalúan las propiedades aislantes del aceite y su capacidad para soportar tensiones eléctricas. Esta estructura resulta esencial para garantizar un diagnóstico integral del estado del aceite, posibilitando la detección temprana de posibles problemas y contribuyendo a la confiabilidad y desempeño eficiente del transformador.

Cuadro 1. Clasificación de Pruebas de Aceites Dieléctricos para Transformadores.

Prueba	Clasificación	Norma Aplicada
Contenido de agua	Química	ASTM D6304 / IEC 60814
Número de neutralización ácido	Química	ASTM D974 / IEC 62021
Rigidez dieléctrica	Dieléctrica	ASTM D877 / IEC 60156
Factor de potencia	Dieléctrica	ASTM D924 / IEC 60247
Resistividad	Dieléctrica	ASTM D1169 / IEC 60247
Apariencia visual	Física	ASTM D1524 / IEC 60422
Color	Física	ASTM D1500
Tensión interfacial	Física / Química	ASTM D971 / ISO 6295
Gravedad específica	Física	ASTM D1298 / ISO 3675

La identificación temprana de problemas, tales como la degradación del aceite, la presencia de partículas contaminantes o la formación de compuestos químicos dañinos, permite implementar acciones preventivas que contribuyen a evitar fallos graves, extender la vida útil del transformador y reducir costos asociados al mantenimiento. Asimismo, estas pruebas garantizan que los equipos operen bajo los estándares de seguridad establecidos, minimizando riesgos para el sistema eléctrico y los usuarios. A continuación, se detallan los distintos análisis realizados al aceite dieléctrico, los cuales son esenciales para fundamentar la toma de decisiones técnicas y operativas.

- **Contenido de agua:** El agua presente en el aceite aislante, ya sea en estado libre o emulsionado, representa un riesgo significativo para el funcionamiento seguro de un transformador. En estado libre, no solo disminuye de manera notable la rigidez dieléctrica del aceite, sino que también facilita la transferencia de humedad hacia la celulosa del papel aislante. Esto puede provocar una reducción de las propiedades aislantes del papel, acelerando su envejecimiento y deterioro. Adicionalmente, la presencia de agua aumenta el riesgo de descargas parciales, fallas dieléctricas y sobrecalentamientos, los cuales pueden derivar en fallos catastróficos del equipo. Este problema generalmente se origina debido a deficiencias en la hermeticidad del transformador, lo que permite la entrada de humedad y otros contaminantes, comprometiendo su fiabilidad operativa, incrementando los costos de mantenimiento y reduciendo su vida útil.
- **Número de neutralización ácido:** Los transformadores están expuestos a procesos de degradación química debido a las condiciones operativas, como el estrés eléctrico, las altas temperaturas y las cargas de trabajo a las que son sometidos. Estos procesos dan lugar a la formación de compuestos ácidos, cuya presencia afecta directamente la calidad del aceite aislante y, por ende, la fiabilidad del equipo. La velocidad de degradación aumenta significativamente en presencia de agua, oxígeno y materiales como cobre, hierro y celulosa. Para controlar estos efectos y prevenir el deterioro acelerado del transformador, resulta fundamental realizar mediciones periódicas del número de neutralización del aceite, ya que esta prueba permite evaluar la acumulación de constituyentes ácidos y tomar medidas preventivas o correctivas para prolongar la vida útil del equipo y garantizar su correcto funcionamiento.
- **Tensión interfacial:** La prueba de tensión interfacial mide la fuerza requerida para separar un anillo plano de Platino-Iridio de la superficie de un fluido con mayor tensión superficial, proporcionando un indicador confiable sobre la presencia de compuestos hidrofílicos. Estos compuestos son generados como resultado de procesos de oxidación y actúan como un parámetro clave para evaluar el estado de degradación del aceite aislante. La importancia de esta prueba radica en que permite detectar de manera temprana la formación de productos de oxidación, los cuales pueden afectar negativamente las propiedades dieléctricas y químicas del aceite, comprometiendo la eficiencia y seguridad del transformador. Este análisis es crucial para implementar estrategias de mantenimiento preventivo que prolonguen la vida útil del equipo y optimicen su desempeño operativo.
- **Rigidez dieléctrica:** La rigidez dieléctrica es una medida fundamental que evalúa la capacidad de un material aislante para resistir tensiones eléctricas crecientes sin experimentar fallos. Este ensayo se lleva a cabo aplicando de manera progresiva una tensión entre dos electrodos de bronce, cuya geometría y separación están definidas por normativas específicas. Su relevancia radica en que actúa como un indicador preliminar de la presencia de contaminantes en el aceite, tales como agua, fibras de celulosa, partículas en suspensión o materiales conductores. La identificación de estos elementos

es crucial, ya que comprometen las propiedades aislantes del aceite y pueden generar fallos eléctricos en el transformador. Por lo tanto, esta prueba es esencial para garantizar la fiabilidad y seguridad operativa del equipo.

- **Factor de potencia:** El factor de potencia es un indicador crítico que evalúa las pérdidas dieléctricas en el aceite aislante, las cuales son ocasionadas por la presencia de contaminantes como compuestos ácidos y agua. Un valor bajo de este parámetro sugiere una mínima pérdida dieléctrica y un nivel reducido de contaminantes solubles, lo que refleja un buen estado del aceite. La relevancia de esta prueba radica en que permite detectar alteraciones químicas y físicas en el aceite, brindando información clave para el mantenimiento preventivo del transformador. Monitorear el factor de potencia ayuda a preservar la integridad del sistema de aislamiento, prolongar la vida útil del equipo y prevenir fallas inesperadas en la operación.
- **Resistividad:** La resistividad, también conocida como resistencia específica, es una medida que evalúa las propiedades aislantes eléctricas de un líquido dieléctrico en condiciones similares a las del ensayo. Un valor elevado de resistividad indica un bajo nivel de iones libres y partículas iónicas en formación, lo que a su vez refleja una baja concentración de contaminantes conductivos en el aceite. Esta prueba resulta particularmente relevante en el análisis de aceites nuevos, ya que proporciona una referencia inicial de su calidad y pureza. Su importancia radica en que permite identificar posibles contaminantes que puedan comprometer el rendimiento del sistema de aislamiento, asegurando así la eficiencia operativa y la confiabilidad del transformador.
- **Apariencia visual:** La inspección visual del aceite, tanto en su estado nuevo como usado, es un procedimiento clave para evaluar características físicas esenciales, como el brillo y la transparencia, y para verificar la ausencia de sólidos en suspensión y sedimentos. Este análisis preliminar resulta de gran importancia, ya que permite detectar de forma rápida indicios de contaminación, degradación o presencia de partículas que podrían comprometer las propiedades dieléctricas y la funcionalidad del aceite aislante. La apariencia visual actúa como un indicador inicial del estado del aceite, facilitando decisiones oportunas sobre la necesidad de realizar pruebas más exhaustivas o implementar acciones correctivas.
- **Color:** La prueba del color del aceite consiste en clasificar el color del fluido aislante mediante la comparación con una escala estándar basada en un blanco de referencia. Cualquier desviación significativa respecto al color preestablecido puede ser un indicador de contaminación o de procesos de degradación en el aceite. Este parámetro es crucial para evaluar la calidad del aceite, ya que proporciona una indicación inicial sobre su estado y posibles alteraciones químicas o físicas que podrían comprometer su desempeño como medio aislante y refrigerante en transformadores eléctricos.
- **Gravedad específica:** La prueba de gravedad específica se define como la relación entre la masa de un volumen determinado de aceite y la masa de un volumen equivalente de agua. Este ensayo es de gran utilidad como método rápido para identificar la posible presencia de contaminantes en el aceite aislante. Además, permite determinar características clave como el tipo de aceite, ya sea de origen nafténico o parafínico, y detectar la presencia de compuestos tóxicos como los bifenilos policlorados (PCBs). La relevancia de esta prueba radica en que proporciona información esencial para evaluar la calidad del aceite, garantizar la seguridad del transformador y mitigar posibles riesgos ambientales.

Análisis de los gases disueltos mediante la prueba de la cromatografía

El análisis cromatográfico de gases disueltos en el aceite dieléctrico es una herramienta analítica fundamental para el monitoreo y diagnóstico del estado de los transformadores. Este procedimiento, regulado por la norma ASTM D3612, permite identificar y cuantificar gases como acetileno (C_2H_2), etano (C_2H_6), etileno (C_2H_4), metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2), oxígeno (O_2) y nitrógeno (N_2). La presencia y concentración de estos gases se asocian directamente con fallas internas que pueden clasificarse en dos categorías principales:

- **Fallas Térmicas**: relacionadas con el sobrecalentamiento del aceite o el papel aislante, que generan gases como metano, etileno y dióxido de carbono.
- **Fallas Eléctricas:** ocasionadas por arcos internos o descargas de efecto corona, que producen gases como hidrógeno, acetileno y metano.

En algunos casos, estos tipos de fallas pueden superponerse, ya que diferentes procesos de degradación pueden ocurrir simultáneamente dentro del transformador. Este análisis no solo permite determinar la naturaleza y ubicación de las fallas, sino que también facilita su diagnóstico temprano, lo que es crucial para implementar acciones correctivas antes de que las fallas evolucionen y comprometan la operación del equipo. Además, los objetivos del análisis cromatográfico son diversos e incluyen: monitorear los transformadores en servicio para detectar fallas incipientes, supervisar unidades con sospecha de fallas para planificar su mantenimiento, identificar el tipo y localización de las fallas, y garantizar que los transformadores nuevos no presenten problemas durante el período de garantía. La cromatografía de gases es esencial para la gestión eficiente de los transformadores, ya que contribuye a la confiabilidad operativa, prolonga la vida útil del equipo y optimiza las estrategias de mantenimiento.

Métodos de Análisis para detección de fallas en transformadores

El análisis de gases disueltos en aceites dieléctricos es una técnica fundamental para el diagnóstico y monitoreo del estado interno de los transformadores eléctricos. Este procedimiento utiliza metodologías diversas que permiten interpretar con precisión los datos cromatográficos obtenidos. Entre las principales herramientas de análisis destacan el Triángulo de Duval, el Método del Gas Característico, el Método de las Relaciones de Dornenburg y el Método de las Relaciones de Rogers, cada una con aplicaciones específicas y complementarias en el diagnóstico de fallas.

- **Triángulo de Duval**: Esta técnica gráfica utiliza las proporciones relativas de tres gases clave: metano (CH_4), etileno (C_2H_4) y acetileno (C_2H_2), generados durante procesos térmicos o eléctricos. Los puntos dentro del triángulo representan distintos tipos de fallas, como descargas parciales, sobrecalentamientos o arcos eléctricos. Este método destaca por su simplicidad visual y por proporcionar un diagnóstico rápido y confiable.
- **Método de las Relaciones de Dornenburg**: Basado en relaciones proporcionales entre gases clave, este método clasifica fallas térmicas y eléctricas, ofreciendo una interpretación más detallada de los datos. Es especialmente útil en casos donde se requiere una evaluación más exhaustiva.
- **Método de las Relaciones de Rogers**: Similar al de Dornenburg, este método utiliza relaciones específicas entre gases para clasificar las fallas en categorías como sobrecalentamientos leves o severos y descargas eléctricas. Su simplicidad lo convierte en una herramienta común en el monitoreo de rutina.

El Triángulo de Duval y los métodos basados en relaciones de gases, como los de Dornenburg y Rogers, son herramientas complementarias que proporcionan diferentes niveles de precisión y detalle. Mientras que el Triángulo de Duval es útil para diagnósticos rápidos y visuales, los métodos basados en relaciones permiten un análisis más profundo y validación de resultados. Por su parte, el Método del Gas Característico ofrece un enfoque flexible y adaptable a escenarios específicos, por lo que no se detalla en la sección de resultados de la presente nota técnica. La integración de estas técnicas asegura diagnósticos confiables y oportunos, lo que facilita la detección temprana de fallas internas, optimiza las estrategias de mantenimiento preventivo y prolonga la vida útil de los transformadores. Su aplicabilidad en distintos contextos industriales subraya su importancia como herramientas esenciales para la gestión eficiente de sistemas eléctricos críticos. La tabla 2 presenta la información técnica de un grupo de transformadores de potencia, detallando por su capacidad nominal de potencia (MVA), niveles de tensión en el lado primario y secundario (kV) y año de fabricación.

Resultados

Caso de estudio

A partir de la información recopilada, se realizará un análisis exhaustivo del estado operativo de diez transformadores de potencia, conforme se presenta en el cuadro 2. Tal como se expuso previamente, es posible aplicar distintos enfoques para evaluar la condición del aceite dieléctrico, tanto a nivel individual como grupal. Cuando el análisis se efectúa de manera grupal, el propósito es identificar el estado de cada transformador de forma independiente, sin que exista relación entre las mediciones, dado que los resultados reflejan las condiciones particulares de cada equipo. En cambio, cuando se dispone de un registro histórico de resultados, es posible establecer una trazabilidad temporal que permita analizar la evolución y verificar el comportamiento del aceite dieléctrico.

Cuadro 2. Muestra de Transformadores de Potencia a Analizar.

Muestra	Potencia del Transformador (MVA)	Tensión Primaria (kV)	Tensión Secundaria (kV)	Año de Fabricación
Muestra-1	50	132	33	2001
Muestra-2	50	220	66	2001
Muestra-3	50	110	11	2001
Muestra-4	30	400	132	1972
Muestra-5	50	132	33	2001
Muestra-6	50	110	11	2001
Muestra-7	25	220	66	1969
Muestra-8	25	132	33	1969
Muestra-9	25	400	132	1969
Muestra-10	25	220	66	1969

Cada estudio proporcionará información precisa sobre el estado actual y la funcionalidad de los transformadores, posibilitando la correlación entre su antigüedad, capacidad nominal y nivel de tensión de operación. Este enfoque integral permitirá evaluar de manera más completa el estado del aceite y contribuirá al diseño de estrategias de mantenimiento predictivo orientadas a optimizar la vida útil de los transformadores.

Un aspecto relevante en el análisis de los transformadores [16,17] es la consideración del año de fabricación, dado que los materiales dieléctricos tienden a degradarse significativamente con el paso del tiempo. Asimismo, los niveles de tensión deben ser tomados en cuenta, ya que un mayor esfuerzo dieléctrico asociado a tensiones elevadas acelera el deterioro del aislamiento. De forma complementaria, la potencia nominal constituye un indicador del estrés térmico al que está sometido el equipo, puesto que la temperatura depende directamente del cuadrado de la corriente y de la resistencia del conductor. Este comportamiento se encuentra, a su vez, estrechamente vinculado con los niveles de tensión presentes en cada lado del transformador (primario y secundario).

Análisis Físico-Químico-Dieléctrico y Cromatografía de gases al Aceite

El cuadro 3 presenta los resultados de las pruebas *Físico-Químico-Dieléctrico* del aceite utilizado en los transformadores de muestra, los que incluyen el contenido de agua, el número de neutralización ácido, la rigidez dieléctrica, el factor de potencia, la resistividad, la apariencia visual, el color, la tensión interfacial y la gravedad específica. Estos parámetros son fundamentales para evaluar la calidad y el estado de degradación del aceite, lo que permite determinar su capacidad de aislamiento y su eficiencia en la disipación del calor dentro del transformador. De igual forma, como en el caso anterior a través del análisis de estas variables, se busca establecer la correlación entre el envejecimiento del aceite y el estado operativo del transformador.

Cuadro 3. Análisis *Físico-Químico-Dieléctrico* al aceite de los transformadores de muestra.

Muestra	Contenido de Agua [ppm]	Número de Neutralización Ácido [mg KOH/g]	Rigidez Dieléctrica [kV/mm]	Factor de Potencia [%]	Resistividad [GΩ·m]	Apariencia Visual	Color (ASTM D1500)	Tensión Interfacial [mN/m]	Gravedad Específica
Muestra-1	12.5	0.05	30.5	0.12	2.5	Transparente	1	40.5	0.91
Muestra-2	15	0.12	28	0.15	2.8	Transparente	1.2	42	0.915
Muestra-3	13.2	0.08	31.2	0.14	2.7	Transparente	1.1	41.2	0.912
Muestra-4	10.8	0.04	29.8	0.11	2.6	Transparente	0.9	39.8	0.908
Muestra-5	11.7	0.07	30.7	0.13	2.4	Transparente	1	40.7	0.91
Muestra-6	14.6	0.11	27.6	0.14	2.9	Transparente	1.3	42.6	0.913
Muestra-7	13.8	0.09	29.8	0.12	2.8	Ligeramente Opaco	1.1	41.8	0.911
Muestra-8	12.3	0.06	31.4	0.13	2.7	Ligeramente Opaco	1	40.4	0.909
Muestra-9	11.5	0.05	30.5	0.11	2.5	Ligeramente Opaco	0.8	39.5	0.91
Muestra-10	13	0.07	28.9	0.14	2.6	Ligeramente Opaco	1.2	41	0.914

El cuadro 4 muestra los datos sobre el análisis de los gases disueltos al aceite dieléctrico de los transformadores, que incluyen concentraciones de acetileno, etano, etileno, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno, así como los porcentajes de oxígeno y nitrógeno. El análisis de estos gases es un método clave en el diagnóstico de fallas internas en transformadores, ya que permite identificar la presencia de descargas parciales, sobrecalentamiento, formación

de arcos eléctricos y degradación térmica del aislamiento. La correlación entre la concentración de estos compuestos y el estado operativo del transformador facilitará la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo, optimizando la confiabilidad y prolongando la vida útil del equipo.

El cuadro 5 establece los rangos de aceptación para diversos parámetros *Físico-Químico-Dieléctrico* y de gases disueltos en el aceite dieléctrico de la muestra de transformadores, los cuales son indicadores clave del estado del aislamiento y del funcionamiento del equipo. Estos valores de referencia permiten identificar la presencia de gases generados por fallas internas, como descargas parciales o sobrecalentamiento, así como la calidad del aceite en términos de contenido de agua, acidez, rigidez dieléctrica y estabilidad química. Se han analizado diez muestras de aceite provenientes de transformadores de distinta capacidad y antigüedad tal y como se muestra en las tablas 3 y 4 . Los parámetros evaluados incluyen gases disueltos como hidrógeno, metano, etano, etileno y acetileno, además de compuestos de monóxido y dióxido de carbono, nitrógeno y oxígeno. También se consideraron factores físico-químicos como el contenido de agua, el número de neutralización ácido, la rigidez dieléctrica, el factor de potencia, la resistividad, la apariencia visual, el color según ASTM D1500, la tensión interfacial y la gravedad específica. Los valores obtenidos se contrastaron con los límites de aceptación para determinar posibles desviaciones y su impacto en la operación de los transformadores como se observa en el cuadro 5.

Cuadro 4. Análisis de *Cromatografía de Gases* al aceite de los transformadores de muestra.

Muestra	Hidrógeno (H2) [ppm]	Metano (CH4) [ppm]	Etano (C2H6) [ppm]	Etileno (C2H4) [ppm]	Acetileno (C2H2) [ppm]	Monóxido de Carbono (CO) [ppm]	Dióxido de Carbono (CO2) [ppm]	Nitrógeno (N2) [ppm]	Oxígeno (O2) [ppm]
Muestra-1	8	2	1	2	5	32	591	70161	17306
Muestra-2	10	2	3	4	8	22	805	56692	15979
Muestra-3	6	2	3	3	11	53	1368	48919	15603
Muestra-4	5	19	16	123	8	274	2413	63850	2104
Muestra-5	13	2	4	6	8	22	949	47011	16025
Muestra-6	6	1	1	1	4	26	553	63878	18929
Muestra-7	26	36	21	153	1	108	2224	67098	15369
Muestra-8	17	77	88	474	7	247	4753	60261	13271
Muestra-9	13	49	31	282	4	351	4887	64345	14500
Muestra-10	3	3	4	82	3	486	5765	39152	12913

El análisis de las muestras reveló que algunas presentan concentraciones de gases fuera de los valores recomendados, lo que sugiere la presencia de procesos de degradación interna. Además, se evaluaron características dieléctricas y físico-químicas:

- La Muestra-1 presenta un contenido de agua de 12.5 ppm y un número de neutralización de 0.05 mg KOH/g, con una rigidez dieléctrica de 30.5 kV/mm. No obstante, su nivel de acetileno de 5 ppm está fuera del rango aceptable, lo que podría indicar descargas parciales.
- La Muestra-2, se registró una rigidez dieléctrica de 28 kV/mm, con un factor de potencia de 0.15%, lo que sugiere una leve degradación del aceite. Además, el acetileno de 8 ppm y el nitrógeno fuera de rango pueden indicar problemas en la hermeticidad del sistema de aislamiento.

- La Muestra-3 muestra una resistividad de 2.7 GΩ·m, una tensión interfacial de 41.2 mN/m y un contenido de acetileno de 11 ppm, lo que podría indicar deterioro avanzado del aislamiento.
- La Muestra-4 evidencia un color ASTM D1500 de 0.9 y una gravedad específica de 0.908, con un etileno de 123 ppm, lo que sugiere sobrecalentamiento del aceite y degradación de componentes celulósicos.
- En la Muestra-5, se detectó un factor de potencia de 0.13%, un contenido de agua de 11.7 ppm y una concentración de acetileno de 8 ppm, lo que refuerza la posibilidad de procesos internos de descargas parciales.
- La Muestra-6 presentó una rigidez dieléctrica de 27.6 kV/mm y un color ASTM D1500 de 1.3, sugiriendo una ligera degradación del aceite.
- La Muestra-7 muestra un aspecto ligeramente opaco, con un color ASTM D1500 de 1.1 y un etileno de 153 ppm, lo que podría estar asociado a la oxidación del aceite y sobrecalentamiento.
- La Muestra-8 presenta un contenido de agua de 12.3 ppm, una resistividad de 2.7 GΩ·m y un etileno de 474 ppm, indicando condiciones críticas de deterioro térmico del aceite.
- La Muestra-9 evidencia una tensión interfacial de 39.5 mN/m, un monóxido de carbono de 351 ppm y un etileno de 282 ppm, lo que sugiere procesos de oxidación avanzados.
- La Muestra-10 presenta una gravedad específica de 0.914 y una rigidez dieléctrica de 28.9 kV/mm, con monóxido de carbono de 486 ppm, lo que podría estar relacionado con la degradación de los componentes celulósicos internos del transformador.

Cuadro 5. Rangos de Aceptación para los transformadores de muestra.

Parámetro	Rango de Aceptación
Acetileno (C2H2) [ppm]	0 - 1
Etano (C2H6) [ppm]	0 - 10
Etileno (C2H4) [ppm]	0 - 20
Metano (CH4) [ppm]	0 - 25
Monóxido de Carbono (CO) [ppm]	0 - 300
Dióxido de Carbono (CO2) [ppm]	0 - 2000
Hidrógeno (H2) [ppm]	0 - 150
Oxígeno (O2) [%]	0 - 5
Nitrógeno (N2) [%]	70 - 80
Contenido de Agua [ppm]	0 - 20
Número de Neutralización Ácido [mg KOH/g]	0.03 - 0.1
Rigidez Dieléctrica [kV/mm]	25 - 35
Factor de Potencia [%]	0 - 0.5
Resistividad [GΩ·m]	≥ 2
Tensión Interfacial [mN/m]	40 - 50
Gravedad Específica	0.850 - 0.920

Análisis de Resultados Método Dornenburg

La Figura 1 presenta el diagnóstico del aceite dieléctrico correspondiente a los transformadores analizados. De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la aplicación del Método Dornenburg, se determinó que las muestras 1, 2, 3, 5 y 6 evidencian posibles *descargas parciales de alta intensidad o fenómenos de arqueo*, mientras que las muestras 4, 7, 8, 9 y 10 muestran indicios de fallas asociadas a *procesos de descomposición térmica*, conforme a los criterios establecidos por dicha metodología.

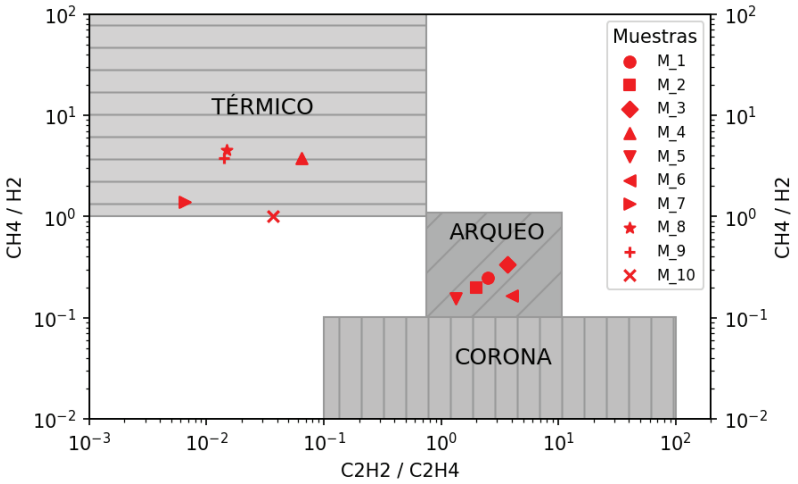


Figura 1. Diagnóstico por el método de Dornenburg a las 10 muestras.

Análisis de resultados por Triangulo de Duval

En la figura 2 se puede diagnosticar las fallas de las muestras de los transformadores analizados. Por su parte, a partir del método de Triangulo Duval se analizan las 10 muestras donde el análisis de las muestras 1, 2, 3, 6, 7, 8 sugieren presencia de descargas de tipo de arco eléctrico. La muestra 4 indica sobrecalentamiento a altas temperaturas (>700°C) mientras que las muestras 9 y 10 indican una falla térmica severa o una descarga de alta energía.

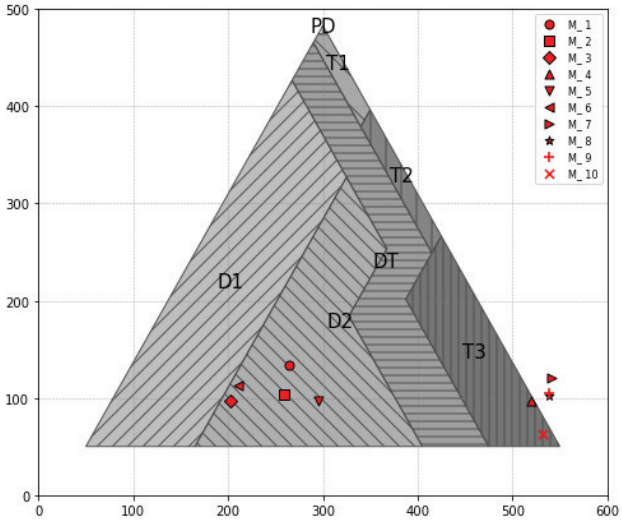


Figura 2: Diagnóstico por el método de Triángulo de Duval a las 10 muestras.

Análisis de resultados por Rogers

La Figura 3 presenta el diagnóstico de fallas del aceite dieléctrico correspondiente a las muestras de los transformadores analizados. De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la aplicación del Método de Rogers, se determinó que las muestras 1, 2, 3, 5 y 6 presentan indicios de *descargas de baja energía*, mientras que las muestras 4, 7, 8, 9 y 10 evidencian *fallas térmicas asociadas a temperaturas superiores a 700 °C*, conforme a los criterios de clasificación establecidos por dicha metodología.

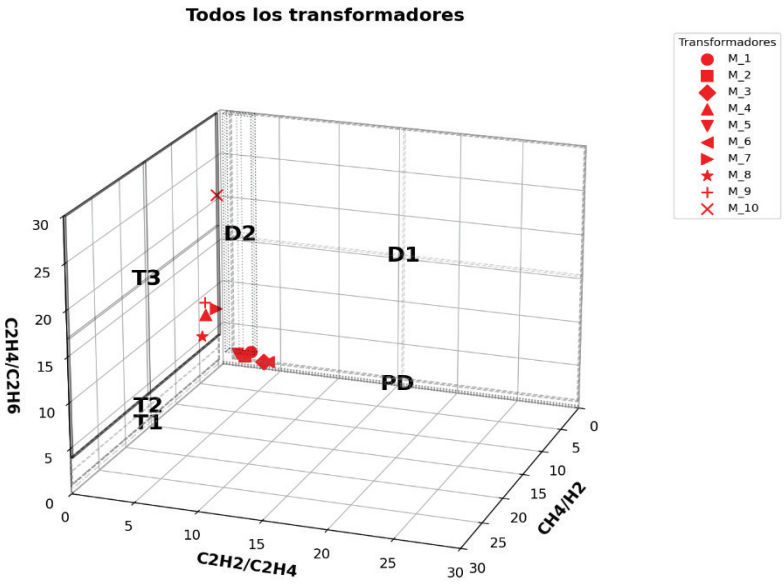


Figura 3. Diagnóstico por el método de Rogers a las 10 muestras.

Discusión de Resultados

El análisis de fallas en los transformadores, utilizando los métodos de Dornenburg, Triángulo de Duval y Rogers, confirma la presencia de anomalías significativas en las muestras evaluadas. De acuerdo con el método de Dornenburg, las muestras 1, 2, 3, 5 y 6 evidencian signos de descargas parciales de alta intensidad o arqueo, mientras que las muestras 4, 7, 8, 9 y 10 presentan indicios de degradación térmica. Por su parte, el método del Triángulo de Duval sugiere que las muestras 1, 2, 3, 6, 7 y 8 han experimentado descargas eléctricas tipo arco, mientras que la muestra 4 muestra evidencia de sobrecalentamiento severo a temperaturas superiores a 700°C. Asimismo, las muestras 9 y 10 reflejan condiciones asociadas a fallas térmicas críticas o descargas de alta energía. Finalmente, el método de Rogers indica que las muestras 1, 2, 3, 5 y 6 están sujetas a descargas de baja energía, mientras que las muestras 4, 7, 8, 9 y 10 exhiben signos de fallas térmicas debido a temperaturas superiores a 700°C. En comparación con el diagnóstico previo basado en el análisis de gases disueltos y las características fisicoquímicas del aceite, los resultados presentan una fuerte correlación. Las muestras que contienen concentraciones elevadas de acetileno y etileno, las cuales indican la presencia de descargas eléctricas y sobrecalentamiento, coinciden con los resultados obtenidos en los métodos de diagnóstico, los cuales identificaron descargas de alta energía y fallas térmicas severas. Asimismo, las muestras con altos niveles de monóxido y dióxido de carbono, lo que sugiere la degradación del aislamiento del papel, corresponden con aquellas en las que se detectaron fallas térmicas avanzadas en los distintos métodos de análisis.

Conclusiones

Los resultados obtenidos a partir del análisis de gases disueltos, propiedades fisicoquímicas del aceite y métodos de diagnóstico como Dornenburg, Triángulo de Duval y Rogers evidencian la presencia de fallas significativas en varios de los transformadores evaluados. Se identificaron descargas parciales, descargas tipo arco y fallas térmicas severas, lo que sugiere un deterioro progresivo del sistema de aislamiento y posibles riesgos de falla operativa. La correlación entre los diferentes enfoques de diagnóstico valida la fiabilidad de los resultados y resalta la necesidad de implementar estrategias de monitoreo continuo y mantenimiento predictivo. En particular, los transformadores con indicios de descargas eléctricas y sobrecalentamiento extremo requieren una intervención prioritaria para evitar daños irreversibles y garantizar la estabilidad del sistema eléctrico.

Agradecimientos

Esta investigación forma parte del proyecto VIE-1341025: Mantenimiento predictivo: desarrollo de sistemas de diagnóstico y pronóstico. Las personas autoras expresan su agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica por su apoyo financiero y asistencia durante esta investigación.

Referencias

[1] Ó. Núñez-Mata, G. Gómez-Ramírez, F. Acuña-Rojas y C. Gonzalez-Solis, «Metodología para Evaluar la Condición de Transformadores Eléctricos de Potencia Basada en un Índice de Salud,» *Ingeniería,* vol. 33, nº 1, pp. 34-47, 2023.

[2] H. de-Faria, J. G. Spir-Costa y J. L. Mejia-Olivas, «A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 46, nº https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.052, pp. 201-209, 2015.

[3] C. Collazos, V. Arroyo, M. Chauca, J. Ramos, J. Morales y R. Cuba, «Characterization of Faults in Power Transformers Based on Oil Chromatographic Analysis in the Coastal Zone,» de *11th International Conference on Information and Electronics Engineering (ICIEE 2022)*, Online. DOI 10.1088/1742-6596/2261/1/012002, 2022.

[4] M. Duval, «Fault gases formed in oil-filled breathing EHV power transformers- The interpretation of gas analysis data,» de *IEEE PAS conf.*, Paper No C 74 476-8, 1974.

[5] M. Duval y J. Dukarm, «Improving the reliability of transformer gas-in-oil diagnosis,» *IEEE Electrical Insulation Magazine,* vol. 21, nº DOI: 10.1109/MEI.2005.1489986, pp. 21-27, 2005.

[6] O. Shutenko y O. Kulyk, «Recognition of low-temperature overheating in power transformers by dissolved gas analysis,» *Electrical Engineering,* vol. 104, nº https://doi.org/10.1007/s00202-021-01465-5, pp. 2109-2121, 2022.

[7] E. Dornenburg y W. Strittmatter, «Monitoring oil-cooled transformers by gas-analysis,» *Brown Boveri Review,* vol. 61, pp. 238-247, 1974.

[8] R. Rogers, «IEEE and IEC codes to interpret incipient faults in transformers using gas in oil analysis,» *IEEE Transactions on Electrical Insulation,* vol. 13, pp. 349-354, 1978.

[9] O. Gouda, S. El-Hoshy y H. Tamaly, «Condition assessment of power transformers based on dissolved gas analysis,» *IET Generation, Transmission & Distribution,* vol. Vol.13 Iss. 12, nº doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6168, pp. 2299-2310, 2019.

[10] Ó. Nuñez-Mara, F. Acuña-Rojas, C. González-Solís y G.-R. Gustavo, «Assessment of Power Transformers using a Methodology Based on Health Indices,» de *IEEE International Conference on Automation/XXIV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)* , 978-1-6654-0127-2/21, 2021.

[11] Institute of Electrical and Electronics Engineers, «IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers,» *IEEE Std C57.104-2019,* vol. doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8890040, pp. 1-98, 2019.

[12] International Electrotechnical Commission, «Oil-filled electrical equipment - Sampling of free gases and analysis of free and dissolved gases in mineral oils and other insulating liquids - Guidance,» *IEC Standard 60567:2023,* 2023.

[13] S. Bazi, H. Nhaila y M. El Khaili, «Artificial Intelligence for Diagnosing Power Transformer Faults,» de *4th International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)* , DOI: 10.1109/IRASET60544.2024.10548561, 2024.

[14] L. Jin, D. Kim, K. Y. Chan y A. Abu-Siada, «Deep Machine Learning-Based Asset Management Approach for Oil- Immersed Power Transformers Using Dissolved Gas Analysis,» *IEEE Access,* vol. 24, nº doi: 10.1109/ACCESS.2024.3366905, pp. 27794-27809, 2024.

[15] Suwarno, H. Sutikno, R. Azis Prasojo y A. Abu-Siada, «Machine learning based multi-method interpretation to enhance dissolved gas analysis for power transformer fault diagnosis,» *Heliyon,* vol. 10, nº Issue 4, e25975, 2024.

[16] G. Jiménez-Araya and G. A. Gómez-Ramírez, "Comportamiento de los aislamientos sólidos de transformadores de potencia en condiciones ambientales no controladas," *Tecnología en Marcha*, vol. 29, no. 3, pp. 99–116, 2016. [Online]. Available: http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822016000300099. doi: 10.18845/tm.v29i3.2891.

[17] L. D. Acuña-Barrantes and G. A. Gómez-Ramírez, "Metodología indirecta para la estimación de vida útil residual de transformadores de potencia a partir de la evaluación de los materiales dieléctricos," *Tecnología en Marcha*, vol. 33, no. 3, pp. 45–56, 2020. [Online]. Available: http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822020000300045. doi: 10.18845/tm.v33i3.4485.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Para la revisión gramatical y ortográfica de este artículo, empleamos la herramienta de IA *Google AI Studio*. Esta nos permitió identificar errores y mejorar la fluidez del texto. No obstante, realizamos una revisión final para garantizar que el artículo cumpliera con los estándares de calidad de la revista.

Propulsión bidireccional de nadadores de remo flexible

Bidirectional propulsion of flexible oar swimmers

Luis Felipe Córdoba-Ramírez[1]

Fecha de recepción: 10 de abril, 2025
Fecha de aprobación: 23 de julio, 2025

Córdoba-Ramírez, L.F. Propulsión bidireccional de nadadores de remo flexible. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 1. Enero-Marzo, 2026. Pág. 29-40.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i1.7872

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
lfcordoba@itcr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0003-2345-1528

Palabras clave

Micronadadores; bidireccionalidad; nadadores remo flexible; bajo números de Reynolds; locomoción.

Resumen

La capacidad de controlar micronadadores en el régimen de bajo números de Reynolds puede permitir el acceso a regiones del cuerpo previamente inalcanzables para aplicaciones biomédicas como la administración de fármacos dirigidos y la microcirugía. Los nadadores de remos flexibles pueden generar propulsión mediante la oscilación de estructuras elásticas pasivas. Sin embargo, la bidireccionalidad no se ha demostrado previamente de forma experimental con nadadores de remo flexible. La incapacidad de moverse hacia atrás limita la capacidad de navegación de los micronadadores de remo flexible, especialmente en entornos altamente confinados en los que girar es difícil o inviable. En este estudio, demostramos experimentalmente que la propulsión bidireccional de los nadadores de remos flexibles puede introducirse incorporando un perfil intrínsecamente curvado que se acciona transversalmente en un extremo del nadador. Demostramos que los nadadores intrínsecamente curvados son capaces de una propulsión bidireccional positiva, negativa y dependiente de la frecuencia, lo que podría utilizarse en entornos muy confinados en los que el giro es difícil o inviable. En última instancia, con la capacidad de lograr la propulsión bidireccional, prevemos que el robot intrínsecamente curvado puede realizar una nueva clase de micronadador que puede abordar una amplia gama de necesidades clínicas no satisfechas.

Keywords

Microswimmers; bidirectionality; flexible oar swimmers; low Reynolds numbers; locomotion.

Abstract

The ability to control microswimmers in the low Reynold's regime can enable access to previously unreachable regions in the body for biomedical applications such as targeted drug delivery and microsurgery. Flexible oar swimmers can generate propulsion by oscillating passive elastic structures. However, bidirectionality has not been previously experimentally demonstrated with flexible oar swimmers. The inability to move backward limits the navigation capabilities of flexible oar microswimmers, especially in highly confined environments where turning is challenging or infeasible. Here, we experimentally demonstrated that bidirectional propulsion of flexible oar swimmers can be introduced by incorporating an intrinsically-curved profile that is transversely actuated at one end of the swimmer. We show that the intrinsically curved swimmers are capable of positive, negative, and frequency-dependent bidirectional propulsion which could be utilized in highly confined environments where turning is challenging or infeasible. Ultimately, with the ability to achieve bidirectional propulsion, we envision that the intrinsically curved robot can realize a new class of microswimmer that can address a broad range of unmet clinical needs.

Introduction

Locomotion at the microscale is crucial to an organism's survival [1] and is related to its ability to find food, reproduce, and colonize new environments [2]. The ability of microorganisms to move in the low Reynold's regime has motivated the development of artificial microscale swimmers [3]–[6], driven by biomedical applications such as targeted drug delivery and microsurgery [7]–[13]

and pipe exploration in viscous fluids or confined spaces [14], [15]. However, the microscale motion occurs at low Reynolds (Re) number environments where viscous forces dominate over inertial forces and where locomotion must incorporate nonreciprocal motions [16], [17].

Swimming mechanisms for low Re locomotion include the “corkscrew,” “three-link,” “three-linked sphere,” and “flexible oar.” The corkscrew and flexible oar methods can be implemented with a single actuation. Corkscrew swimmers consist of rigid helical structures driven by rotation to move in a manner similar to the motions of *Escherichia coli* (*E. coli*). Flexible oar swimmers, on the other hand, consist of passive elastic structures that are driven by oscillation and generate propulsion due to interactions between the elastic swimmer and fluid [17]. However, most artificial swimmers are incapable of bidirectional locomotion, which could enhance navigation in highly confined environments where turning is challenging, time-consuming, or infeasible.

Microorganisms have been observed to exhibit bidirectional propulsion. For instance, various bacterial species go through polymorphic modifications to use their flagellar appendages to propel forward and backward [18]. Additionally, sperm cells have reportedly been observed swimming backwards in the female reproductive system to fertilize an egg [18]. Inspired by these examples, recent studies have examined bidirectional propulsion for artificial swimmers. For instance, experimental work by Mohanty *et al.* [18] demonstrated arc-shaped magnetic swimmers with bidirectional locomotion using precessing magnetic fields in corkscrew-like actuation. They demonstrated bidirectional locomotion of the arc-shaped microswimmers, by taking advantage of the unique geometry to produce distinct dynamic conformations under precessing magnetic fields.

Likewise, theoretical works [19], [25] have shown that flexible oar swimmers with intrinsic curvature could exhibit bidirectional propulsion at low Re. For instance, work by Liu *et al.* [25] demonstrated a swimmer consisting of two symmetrically oriented elastic tails with circular arc profiles. The researchers found that varying curvatures can increase and reverse swimming direction. In another theoretical work, Liu *et al.* [19] demonstrated swimmers with circular arc and cosinusoidal profiles that could exhibit positive, negative, and bidirectional propulsion when actuated transversely at different frequencies at low Re. While the works presented bidirectional flexible oar swimmers, these findings have yet to be experimentally demonstrated.

Here, we experimentally demonstrate the bidirectional propulsion of flexible oar swimmers. We show intrinsically curved swimmers which are capable of positive, negative, and frequency-dependent bidirectional propulsion which could be utilized in highly confined environments. We also experimentally demonstrate that bidirectionality is curvature-dependent, suggesting that a single actuation frequency could be used for the independent control of multiple swimmers with varying curvatures. We envision the bidirectional intrinsically curved swimmers can be leveraged to increase the navigation versatility of microscale robots such as biomedical robots for targeted therapy and drug delivery.

Methods

Macroscopic experimental setup

To experimentally measure the propulsive force ⟨Fp⟩, experiments were performed in a glass tank (length: 1.20 m, width: 0.45 m) filled with high-viscosity silicone oil with a kinematic viscosity (v) of 100,000 cSt and a density (ρ) of 977 kg/m^3 (CAS # 63148-62-9, Clearco Products Co). The swimmer actuation assembly was attached to a load cell (108AA-100G, ANY LOAD) and suspended, so the actuated end of the swimmer was centered in width and depth (total silicone

depth: 34 cm), and 36.5 cm from the front wall (see Figure 1A). Force and frequency data were acquired using a data acquisition system (NI USB-6343). A camera (EOS R6, Canon) was rigidly mounted above the experiment to acquire swimmer deformation during experiments at 120 fps.

During experiments, swimmers were transversely actuated with frequencies from approximately 1.5 to 8.5 Hz, velocities (*U*) in the range of 94 to 315 mm/s, and swimmer lengths from 15 to 40 mm. Consequently, the Reynolds number ($Re = \rho UL/\mu$) in the experiment was in the range of 10 e^{-1} to 10 e^{-3}, which adequately represents the low Re regime.

Swimmer actuation

To actuate the swimmer during experiments, an assembly was designed which consisted of a 3D-printed housing, a geared DC motor (20.4:1 Metal Gearmotor 25Dx65L mm, Pololu) and Scotch Yoke mechanism to convert the motor's rotation into linear oscillations for transverse actuation of the swimmer. To control β, b was modified by controlling the distance between the disk pin and the disk center (Figure 1D)

Swimmers

The swimmers in this work were 3D printed from photocurable clear resin (Clear Resin, FormLabs) with a layer resolution of 100 µm. After printing, swimmers were washed in isopropyl alcohol (IPA) for 20 min (Form Wash, FormLabs) and post-cured for 60 min at 60°C (Form Cure, FormLabs) following procedures in the material datasheet which reports the material's Young's modulus as E = 2.80 GPa. The rectangular swimmer cross-section was designed to yield in-plane bending during actuation.

Three swimmer profiles were used, namely straight (S), circular arc (C), and cosine (N1). Swimmers with C profiles consisted of a circular arc with a specific angle of curvature. For example, the C90 swimmer consisted of 90 degrees of a circular arc. Swimmers with N1 profiles consisted of one quarter of a cosine wave with an amplitude-to-wavelength ratio of α = 0.5. More specifically, the N1 profile was computed using the following equations from literature [19]:

$$y(s) = a\cos\frac{2\pi\tilde{x}(s)}{\lambda}, \quad \tilde{x} \in [0, N\lambda/4] \tag{1}$$

$$L = \frac{N\lambda}{2\pi}\int_0^{\pi/2}\sqrt{1+(2\pi\alpha\sin x)^2}\,dx \tag{2}$$

where α and λ denote the amplitude and wavelength of the cosine profile, respectively. The swimmer is composed of N quarter-waves, a uniform arclength $\tilde{s}$ and a contour length *L*. The bending stiffness is defined as $A = E^*I$, where *E* is the material Young's modulus and *I* is the second moment of area.

Load *cell* and data acquisition

To measure Fp, a load cell was calibrated and used to attach the top part of the assembly to a rigid external frame (Figure 1B). An excitation voltage of +10 VDC (2231A-30-3 CAL DU, KEITHLEY) was applied across the circuit. The frequency dependent Fp was studied across a range of ω between approximately 1.5 Hz and 8.5 Hz which was controlled by modulating the input voltage of the geared DC motor. The data acquisition system and a custom LabVIEW program (National Instruments) were used to simultaneously acquire the Fp and ω.

Data postprocessing

Experiment data were postprocessed using the custom MATLAB-based software Swimmer postprocessing, which consists of two MATLAB scripts, *Postprocess_B01.m* and *analyzeTest_B01.m*, to determine ⟨Fp⟩ and ⟨ω⟩. A second-order lowpass Butterworth filter was used to filter the force data to facilitate the identification of each period of oscillation. Preliminary experiments showed that steady-state motion was reached after approximately the first 50 periods of oscillation. Consequently, ⟨Fp⟩ and ⟨ω⟩ were determined in a window between the 100th oscillation and 110th oscillation. The time-averaged propulsive forces and frequencies for each experimental trial were computed as the mean values from the measurement window.

For each test condition, two independent experimental runs were performed to assess repeatability. Within each run, the software computed the mean and standard deviation of both ⟨Fp⟩ and ⟨ω⟩ across the ten steady-state cycles. These standard deviations quantify the variability in the force and frequency measurements and were used to estimate the percentage error for each condition. The reported ⟨Fp⟩ and ⟨ω⟩ values represent the mean of the two independent runs, while their corresponding standard deviations reflect the combined experimental uncertainty.

In addition, video data were processed using the Tail Tracking.m software, a custom MATLAB-based code developed to track the motion of the object throughout each experimental trial. The software generates a video representation of the tracked trajectory, allowing the movement profile of the object during its motion to be visualized and analyzed. This processing was used to characterize the trajectory and movement pattern of the object during the experiments.

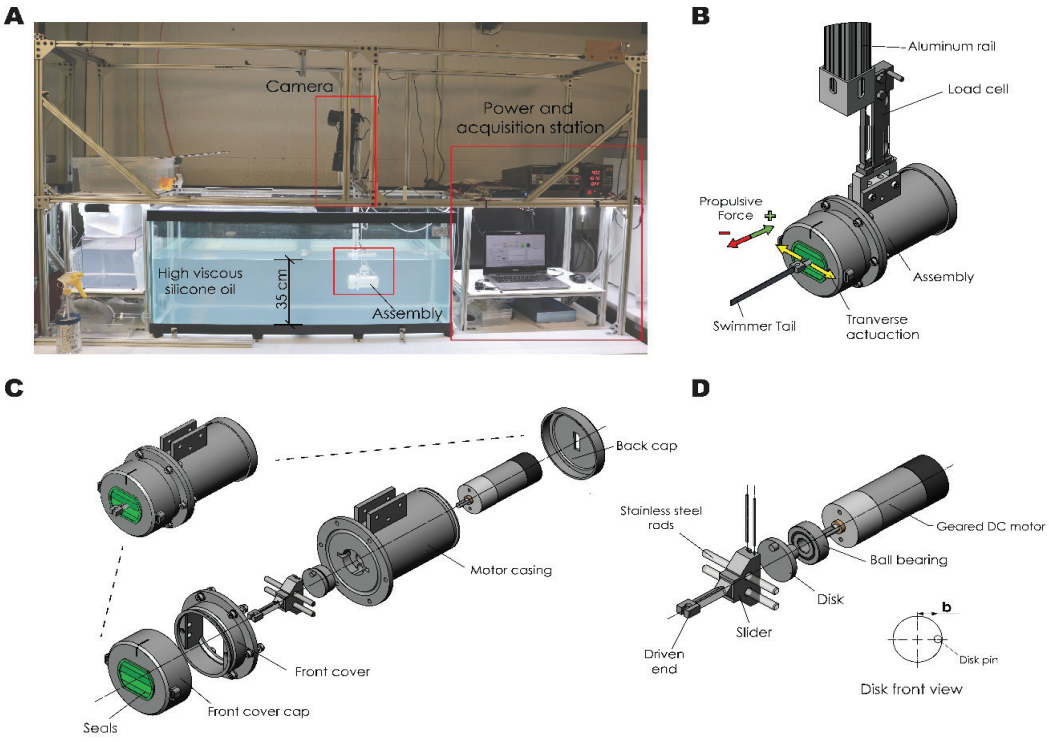


Figure 1. Experiment setup built to measure propulsion force of different swimmers. (A) Macroscopic setup comprised by the glass tank filled with silicone oil, assembly attached to the aluminum frame by the load cell, camera, and power and acquisition equipment. Assembly immersed half of the silicone oil height. (B) The actuation assembly and load cell to measure propulsive force. Indication of the propulsive force direction and swimmer's actuation. (C) Exploded view and components of the assembly. (D) Scotch yoke mechanism. The disk and slider from the Scotch yoke convert the motor's rotation into a linear movement. The actuation amplitude b is the half distance the filament's head will move back and forth.

Results and discutions

Swimmer's design and actuation

To experimentally study the bidirectional propulsion of flexible curved swimmers via the flexible oar swimming method, we designed swimmers with intrinsically-curved and straight profiles along the swimmer length. Two types of intrinsically-curved profiles, circular arc ("C90") and cosine ("N1"), were studied and compared to straight ("S") profiles. The C90 profile has a constant curvature that consists of 90 degrees of a circular arc, while the N1 profile has variable curvature that consists of one-quarter wavelength of a cosine curve, and amplitude to wavelength ratio (α) of 0.5. The swimmers, shown in Figure 2A, each have a contour length (L) of 22 mm and a rectangular cross-section with a height (h) of 5 mm and a thickness (t) of 0.5 mm.

Swimmers were experimentally tested with a macroscale setup in high viscosity silicone oil to achieve low Reynolds numbers between approximately 10 ϵ^{-1} and 10 ϵ^{-3}. Swimmers were actuated by transverse oscillation at the leading edge, as shown in the inset in Figure 2Ai. The actuation frequency ⟨ω⟩ was adjusted to examine the frequency-dependent force, and the oscillation amplitude (b) was determined by the dimensionless variable β = b/L. During actuation, the flexible swimmer exhibited passive in-plane bending which induced a propulsive force due to traveling waves along the tail. [17] The propulsive force ⟨Fp⟩ and ω were simultaneous measured and used to determine the time-average propulsive force ⟨Fp⟩ and frequency ⟨ω⟩.

Effect of swimmer profile on frequency-dependent propulsive force

To determine the effect of swimmer profile on bidirectional propulsion, we first determine the ⟨Fp⟩, calculated over ten consecutive oscillations (details in methods), when the swimmer is actuated between approximately 1.5 to 8.5 Hz (Figure 2B). A comparison of the data in Figure 2B shows that the propulsive force depends on swimmer profile. Indeed, the C90 and N1 profiles exhibit bidirectional propulsion with negative propulsion at low frequencies (C90: -0.80 ± 0.10 mN at 1.80 Hz, N1: -1.29 ± 0.11 mN at 1.71 Hz) and positive propulsion (C90: 2.90 ± 0.23 mN at 7.87 Hz, N1: 0.66 ± 0.19 mN at 7.41 Hz) at high frequencies. From the data, we estimate that bidirectionality occurs at approximately 3.0 Hz for the C90 swimmer and 6.0 Hz for the N1 swimmer. In comparison, the straight swimmer exhibits only positive forces, as expected from theory [19], [28]across the same frequency range. The bidirectional behavior observed for C90 and N1 is consistent with previous experimental and theoretical studies [18],[19],[25] showing that intrinsic curvature and the elastohydrodynamic response determine swimming direction when the actuation frequency crosses a critical value. Instantaneous profiles in Figure 2C enable visualization of the profile's deformation in one oscillation cycle. Mechanistically, at low ω the filament deforms quasi-statically and curvature-dominated strokes produce net rearward thrust; as ω increases the phase lag between base actuation and filament deformation grows and the filament adopts waveforms that are effectively forward-traveling, producing forward thrust. Those profile's deformations could be used in future studies to provide more insights into the relationship between the tail's deformation and bidirectionality.

Effect of circular arc profile angle on bidirectionality

To further investigate the effect of intrinsic curvature on bidirectionality, experiments were performed with circular arc ("C") swimmers with angles of curvature between 0 and 180 degrees and the same contour length (L = 22 mm). The swimmers were transversely actuated (see Figure 3B) at three frequencies (1.5, 3.0, and 6.0 Hz) and β was fixed at 0.25, with two trials performed at each ω.

Results in Figure 3A reveal that the time-averaged propulsive force magnitude and direction can be affected by modifying the intrinsic curvature. At low curvature, swimmers exhibit only positive propulsion at the studied ω, whereas at higher curvatures (e.g., angle > 60 degrees), swimmer propulsive force tends to decrease. This finding aligns with an observation from literature, which indicates that increasing curvature reduces propulsive force and induces a lateral force that can change the direction of the total propulsive force [25]. The study also reports that the $\langle \overline{Fp} \rangle$ for an isolated flexible oar swimmer with circular cross-section actuated with angular oscillation reaches a local minimum at a nondimensional circular arc curvature ($\overline{\kappa_c}$) of 2.5. Although our experimental results are for a single flexible oar swimmer with a rectangular cross-section actuated by transverse oscillation, results in Figure 3A show a similar finding at a lower $\overline{\kappa_c}$, as the results show a local minimum with the C120 swimmer, which has a $\overline{\kappa_c}$ of 2.1.Results in Figure 3A demonstrate that the C90, C120, and C150 swimmers exhibit bidirectional propulsion across the studied ω. C120 exhibits the lowest average negative force (-0.77 mN) at ω = 1.5 Hz. The force at the same ω is lower for C90 and C150 swimmers (C90: -0.37 mN, C150: -0.19 mN). At ω = 6.0 Hz, C120 has an average positive force of 1.42 mN, while the positive force values at 6.0 Hz are higher for C90 (1.80 mN) and C150 (1.60 mN). The previous observations indicate that bidirectional propulsion of swimmers with circular arc profiles can be enabled by adjusting swimmer curvature and actuation frequency.

Moreover, the existence of bidirectionality only beyond a threshold curvature (≈ 90° in our tests) agrees with the experimental observations of *Mohanty et al.* [20], who found that arc-shaped microswimmers driven by precessing magnetic fields require a minimum intrinsic curvature to produce propulsion reversal. Both their magnetic-actuation results and our mechanically actuated swimmers indicate that curvature not only breaks fore–aft symmetry but also tunes the relative weight of elastic and viscous timescales that determine the sign of propulsion.

Finally, our findings suggest that intrinsic curvature modulates both the magnitude and the direction of propulsion, with an optimal curvature range ($\bar{\kappa}c \approx 2 – 2.5$) where hydrodynamic and elastic effects balance to yield bidirectionality, consistent with theoretical predictions *[19],[25]* and experimental demonstrations. [18]

Effect of the actuation amplitude on propulsive force

To examine the effect of oscillation amplitude on propulsive force magnitude and direction, experiments were performed at β = 0.10, 0.25, and 0.45. Studying the effect of oscillation amplitude on propulsive force is desirable because higher amplitudes have been shown in prior literature to enhance the propulsion force and locomotion[19]-[25] In each experiment, “b” was modified in the experimental setup (details in Figure 1D) to enable tests at β = 0.10, 0.25, and 0.45. Swimmers with S, C90, and N1 profiles and identical dimensions (L = 22 mm, h = 5 mm, t = 0.5 mm) were actuated in two trials in a frequency range between 1.5 Hz and 8.5 Hz.

First, we analyze the time-averaged propulsive force as a function of the actuation frequency for S, C90, and N1 swimmers (Figure 4B). The experiment results reveal that the magnitude of propulsive force increases with increasing β, suggesting that the force response of swimmers can be improved by increasing actuation amplitude. Indeed, results in Figure 4C demonstrate that the propulsive force scales with β^2, as shown in several other studies.[19]-[25]

Pak and Lauga [29] analytically demonstrated that for small-amplitude periodic deformations, the leading-order propulsion speed scales with the square of the actuation amplitude, as a consequence of the nonlinear coupling between shape and flow field required to break time-reversible motion at low Reynolds number. Similarly, Gazzola *et al.* [30] used direct numerical simulations to show that increasing the nondimensional actuation amplitude leads to a quadratic increase in both propulsive force and swimming efficiency, up to a saturation regime where large-amplitude effects become significant. Experimental work by Qiu *et al.* [1]

on magnetically actuated flexible microswimmers confirmed that the time-averaged propulsive thrust is proportional to β^2 over a broad range of actuation frequencies, thus validating this scaling law experimentally. The N1-22 data in Figure 4C iii indicate that the frequencies at which bidirectionality occurs can differ depending on β. For example, N1-22 exhibits bidirectionality at approximately 6.0 Hz at β = 0.25, and data suggest that bidirectionality could occur at approximately 7.0 Hz at β = 0.45.

The C90-22 data, on the other hand, show bidirectionality at the same approximate ⟨ω⟩ (3.0 Hz), suggesting that the bidirectionality frequency of swimmers with circular arc profiles could be unaffected by actuation amplitude, though further studies are needed to verify this hypothesis. We also note that the β = 0.1 tests exhibited larger standard deviations which are likely due to the relatively lower signal-to-noise ratio from the small propulsive forces at β = 0.1. The relatively lower forces and higher amount of error in β = 0.1 complicate data interpretation and suggest that low oscillation amplitudes could negatively affect swimmer performance in practice.

Figure 4D shows instantaneous profiles for each swimmer at each β. Overall, we observe that the swimmers exhibit higher deformation at higher β, resulting in greater propulsive force. Further work is needed to understand the relationship between instantaneous profiles and propulsive force. We anticipate that a greater understanding of the relationship between instantaneous profile and force could yield additional insights for further enhancing bidirectional propulsion.

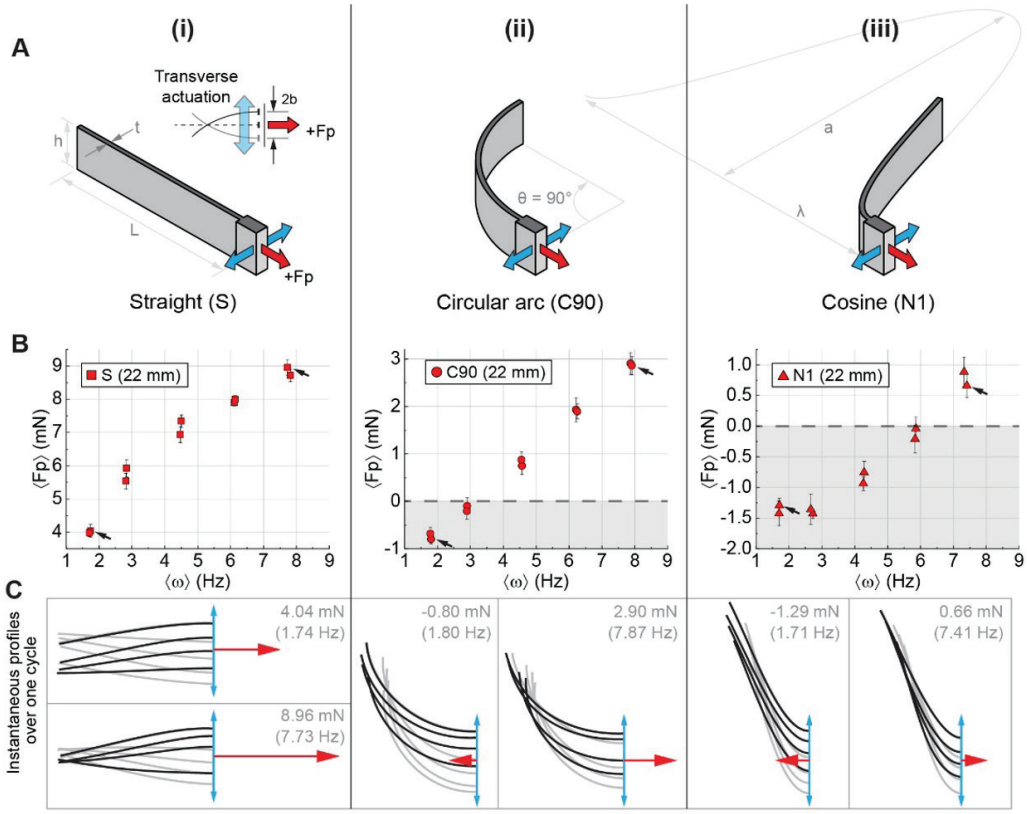


Figure 2. Effect of swimmer profile on frequency-dependent propulsive force. (A) Three-dimensional illustrations of swimmers with straight "S" (i), circular arc "C90" (ii), and cosine "N1" (iii) profiles and the same contour length (L = 22 mm), height (h = 5 mm), and thickness (t = 0.5 mm). Inset in (Ai) shows a top view of transverse actuation (blue arrows), which causes the swimmer to flex and generate a propulsive force (Fp, red arrows). (B) Frequency-dependent time-averaged propulsive force ⟨Fp⟩ of swimmers shown in (A). Comparison between swimmers shows the effect of intrinsic curvature (κ) on the direction and magnitude of the propulsive force at low Re. Bidirectional propulsion can be achieved by the N1 and C90 swimmers by modulating ⟨ω⟩. (C) Instantaneous swimmer profiles showing deformation in one cycle of tests indicated by black arrows in (B). Black and gray profiles show the deformation in an upward and downward stroke, respectively. Red arrows are scaled to represent the force magnitude and direction, and blue arrows indicate the transverse actuation direction. Text labels report ⟨Fp⟩ and ⟨ω⟩.

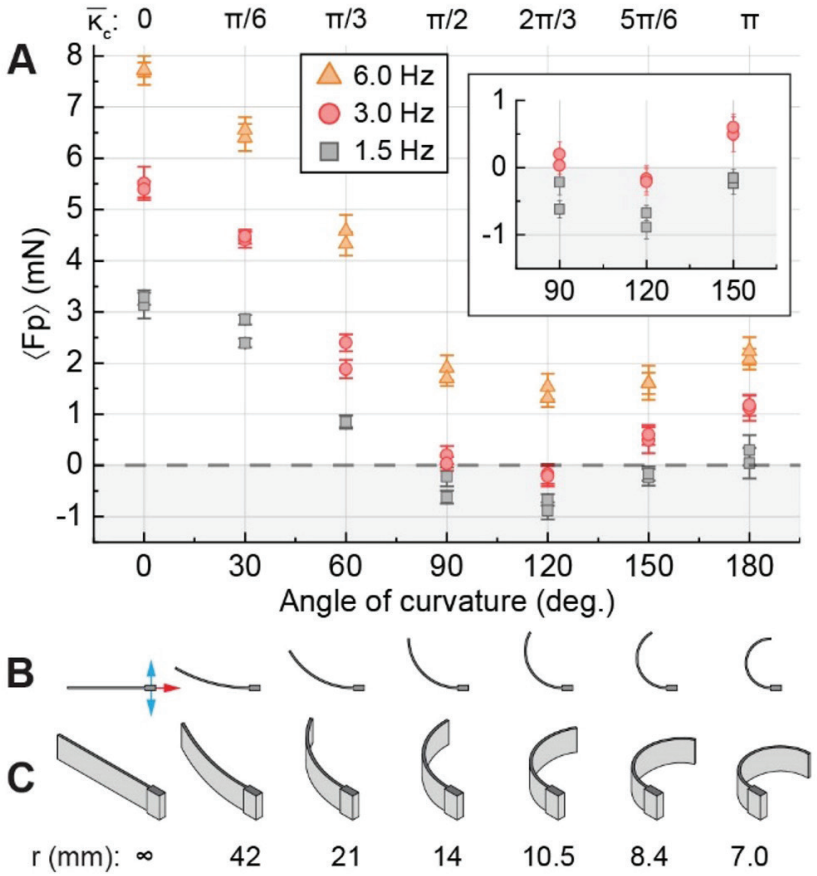


Figure 3. Effect of circular arc curvature on bidirectionality. (A) Frequency-dependent propulsive force as a function of curvature angle for C swimmers with L = 22 mm, h = 5 mm, and t = 0.5 mm. Swimmers were oscillated at three actuation frequencies, with β = 0.25. Error bars show the standard deviation within each experimental trial. Inset shows the swimmers exhibiting bidirectional propulsion. Labels above plot report the nondimensional curvature ($\overline{\kappa_c}$) for each swimmer. (B-C) Top and isometric views of each swimmer with transverse actuation (blue arrows) and positive direction of propulsive force (red arrows) indicated on the "C0" swimmer which has a straight profile.

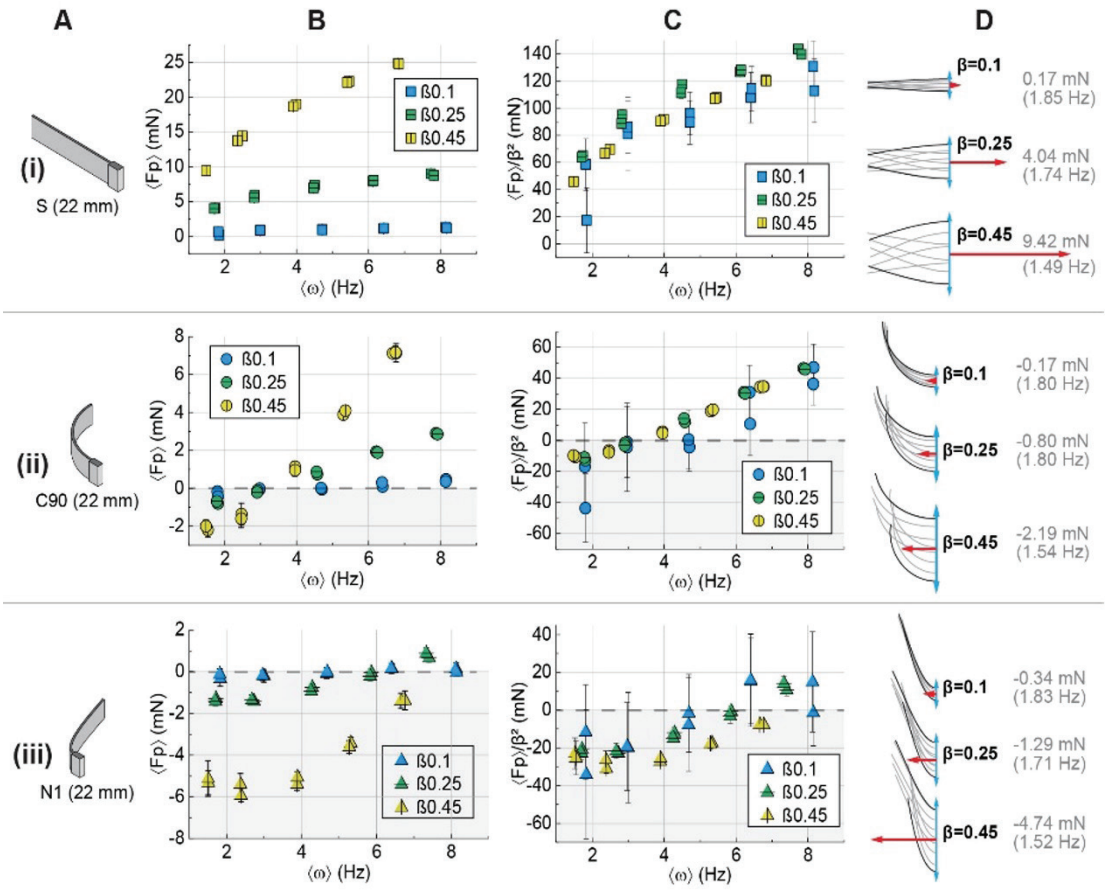


Figure 4. Effect of oscillation amplitude on propulsive force. (A) Three-dimensional illustrations of swimmers with S (i), C90 (ii), and N1(iii) profiles and L = 22 mm. (B) ⟨Fp⟩ for swimmers actuated at three scaled oscillation amplitudes (β = 0.1, 0.25, and 0.45). (C) ⟨Fp⟩ data from (B) scaled by β^2. (D) Instantaneous profiles during one cycle at low frequency for each β, with red arrows scaled to denote the force magnitude and direction. Black lines indicate the profile at the bounds of the oscillation. Text labels report ⟨Fp⟩ and ⟨ω⟩ for the drawn profiles.

Conclusions

The ability to control microswimmers in the low-Reynolds-number regime opens new frontiers in biomedical engineering, enabling access to previously unreachable regions within the human body for applications such as targeted drug delivery, minimally invasive microsurgery, and localized diagnostics. However, conventional flexible oar microswimmers typically exhibit unidirectional propulsion, limiting their navigation capabilities in confined or complex environments.

In this study, we experimentally demonstrated a class of intrinsically curved flexible oar microswimmers capable of bidirectional propulsion at low Reynolds numbers. The combined results from Figures 2–4 revealed that the propulsion direction and magnitude are governed by the interplay between geometry, actuation frequency, and oscillation amplitude. Introducing intrinsic curvature enables swimmers to achieve positive, negative, and frequency-dependent propulsion, allowing directional reversal without reorientation—a key advantage for operation in microvasculature or tissue channels where turning is infeasible. Moreover, the propulsive force

was shown to scale with the square of the actuation amplitude (β^2), consistent with theoretical [29], numerical [30], and experimental [1] studies, confirming that nonlinear coupling between deformation and viscous stresses governs locomotion at low Re.

Despite these promising findings, some experimental limitations should be acknowledged. The experiments were performed in simplified laboratory fluids that do not fully capture the viscoelastic or heterogeneous properties of biological media. The force sensitivity at small oscillation amplitudes ($\beta \approx 0.1$) introduced higher uncertainty in measurements, and potential boundary effects from the tank walls may have influenced the local hydrodynamics. Furthermore, the planar actuation constraint restricted investigation of three-dimensional swimming behaviors that may emerge in free or helical motion. Addressing these limitations will require future studies with improved force resolution, reduced boundary interference, and actuation schemes capable of exploring fully 3D kinematics.

The demonstrated bidirectional propulsion mechanism has important real-world implications. Microswimmers with reversible motion could enhance next-generation microrobotic systems for targeted therapy, minimally invasive surgery, and precision diagnostics. Prior research has established the feasibility of microrobotic propulsion for biomedical use—ranging from biomimetic surgical micro-robots [3], sperm-driven and flagellar microrobots [5], [6], and artificial bacterial flagella for single-cell drug delivery [7], to magnetically guided microrobots for targeted delivery and imaging [8], [9]. Integrating the intrinsic-curvature design with magnetic or acoustic actuation could enable controllable, reversible motion in complex fluidic or biological networks, improving navigation efficiency and reducing the need for external mechanical reorientation.

Ultimately, the introduction of intrinsic curvature as a mechanism for bidirectional propulsion marks a step toward a new class of adaptive microswimmers capable of intelligent navigation in complex microenvironments. Future research should bridge the gap between fundamental mechanics and clinical translation by (i) testing swimmer performance in biologically relevant fluids, (ii) integrating autonomous control via external fields or onboard sensing, and (iii) exploring collective behaviors for swarm-based transport. These advances could lead to functional microrobots capable of operating within living systems—realizing the long-standing vision of controllable, minimally invasive microscale machines for precision medicine.

References

[1] T. Qiu, T. C. Lee, A. G. Mark, K. I. Morozov, R. Münster, O. Mierka, S. Turek, A. M. Leshansky, and P. Fischer, “Swimming by reciprocal motion at low Reynolds number,” *Nat. Commun.*, vol. 5, 2014.

[2] M. Jabbarzadeh, “Hydrodynamic interactions and motion of bacteria at low Reynolds number,” Ph.D. dissertation, Dept. Math., Univ. of Utah, Salt Lake City, UT, USA, 2018.

[3] J. Edd, S. Payen, B. Rubinsky, M. L. Stoller, and M. Sitti, “Biomimetic propulsion mechanism for a swimming surgical micro-robot,” in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. (IROS)*, vol. 3, pp. 2583–2588, 2003.

[4] V. Magdanz *et al.*, “IRON Sperm: Sperm-templated soft magnetic microrobots,” *Sci. Adv.*, vol. 6, no. 28, 2020.

[5] A. V. Singh *et al.*, “Sperm cell driven microrobots—Emerging opportunities and challenges for biologically inspired robotic design,” *Micromachines*, vol. 11, no. 4, 2020.

[6] G. Kósa *et al.*, “Flagellar swimming for medical micro robots: Theory, experiments and application,” in *Proc. IEEE/RAS-EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics (BioRob)*, pp. 258–263, 2008.

[7] R. Mhanna *et al.*, “Artificial bacterial flagella for remote-controlled targeted single-cell drug delivery,” *Small*, vol. 10, no. 10, pp. 1953–1957, 2014.

[8] I. S. M. Khalil *et al.*, “Magnetic control of potential microrobotic drug delivery systems: Nanoparticles, magnetotactic bacteria and self-propelled microjets,” in *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. (EMBS)*, pp. 5299–5302, 2013.

[9] K. T. Nguyen *et al.*, “A magnetically guided self-rolled microrobot for targeted drug delivery, real-time X-ray imaging, and microrobot retrieval,” *Adv. Healthc. Mater.*, vol. 10, no. 6, 2021.

[10] S. Fusco *et al.*, "Shape-switching microrobots for medical applications: The influence of shape in drug delivery and locomotion," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 7, no. 12, pp. 6803–6811, 2015.

[11] D. Jang, J. Jeong, H. Song, and S. K. Chung, "Targeted drug delivery technology using untethered microrobots: A review," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 29, no. 5, 2019.

[12] G. Chatzipirpiridis *et al.*, "Electroforming of implantable tubular magnetic microrobots for wireless ophthalmologic applications," *Adv. Healthc. Mater.*, vol. 4, no. 2, pp. 209–214, 2015.

[13] F. Ullrich *et al.*, "Mobility experiments with microrobots for minimally invasive intraocular surgery," *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, vol. 54, no. 5, pp. 2853–2863, 2013.

[14] Z. Ren *et al.*, "Soft-bodied adaptive multimodal locomotion strategies in fluid-filled confined spaces," *Sci. Adv.*, vol. 7, no. 24, 2021.

[15] H. W. Huang *et al.*, "Adaptive locomotion of artificial microswimmers," *Sci. Adv.*, vol. 5, no. 1, 2019.

[16] J. Lighthill, "Flagellar hydrodynamics," *SIAM Rev.*, vol. 18, no. 2, pp. 161–230, 1976.

[17] E. M. Purcell, "Life at low Reynolds number," *Am. J. Phys.*, vol. 45, no. 1, pp. 3–11, 1977.

[18] S. Mohanty *et al.*, "Bidirectional propulsion of arc-shaped microswimmers driven by precessing magnetic fields," *Adv. Intell. Syst.*, vol. 2, no. 7, 2000064, 2020.

[19] Z. Liu, F. Qin, and L. Zhu, "Actuating a curved elastic filament for bidirectional propulsion," *Phys. Rev. Fluids*, vol. 5, no. 5, 2020.

[20] C. H. Wiggins and R. E. Goldstein, "Flexive and propulsive dynamics of elastica at low Reynolds number," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 80, no. 17, pp. 3879–3882, 1998.

[21] E. Lauga, "Floppy swimming: Viscous locomotion of actuated elastica," *Phys. Rev. E*, vol. 75, no. 4, 2007.

[22] T. S. Singh, P. Singh, and R. D. S. Yadava, "Effect of interfilament hydrodynamic interaction on swimming performance of two-filament microswimmers," *Soft Matter*, vol. 14, no. 19, pp. 7748–7757, 2018.

[23] W. H. Zurek, "Sub-Planck structure in phase space and its relevance for quantum decoherence," *New J. Phys.*, vol. 2, no. 10, 2000.

[24] Z. Peng, G. J. Elfring, and O. S. Pak, "Maximizing propulsive thrust of a driven filament at low Reynolds number via variable flexibility," *Soft Matter*, vol. 13, no. 12, pp. 2339–2346, 2017.

[25] Z. Liu, F. Qin, L. Zhu, R. Yang, and X. Luo, "Effects of the intrinsic curvature of elastic filaments on the propulsion of a flagellated microrobot," *Phys. Fluids*, vol. 32, no. 7, 2020.

[26] O. S. Pak and E. Lauga, "Theoretical models in low-Reynolds-number locomotion," *Soft Matter*, vol. 10, no. 1, pp. 401–414, 2014.

[27] R. Dreyfus, J. Baudry, M. L. Roper, M. Fermigier, and H. A. Stone, "Microscopic artificial swimmers," *Nature*, vol. 437, pp. 862–865, 2005.

[28] T. S. Yu, E. Lauga, and A. E. Hosoi, "Experimental investigations of elastic tail propulsion at low Reynolds number," *Phys. Fluids*, vol. 18, no. 9, 2006.

[29] O. S. Pak and E. Lauga, "Generalized squirming motion of a sphere," *Journal of Engineering Mathematics*, vol. 88, no. 1, pp. 1–28, 2014.

[30] M. Gazzola, M. Argentina, and L. Mahadevan, "Gait and speed selection in slender inertial swimmers," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, vol. 111, no. 36, pp. 13695–13700, 2014.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Para la revisión gramatical y ortográfica de este artículo, empleamos la herramienta de IA *ChatGPT*. Esta nos permitió identificar errores y mejorar la fluidez del texto. No obstante, realizamos una revisión final para garantizar que el artículo cumpliera con los estándares de calidad de la revista..

Análisis de dieciocho años de eventos de emergencias en Costa Rica: pérdidas, personas afectadas e indicadores asociados

Analysis of eighteen years of emergency events in Costa Rica: losses, affected people and associated indicators

Erick Mata-Abdelnour[1], Armando Briceño-Contreras[2]

Fecha de recepción: 15 de abril, 2025
Fecha de aprobación: 7 de agosto, 2025

Mata-Abdelnour, E: Briceño-Contreras, A. Análisis de dieciocho años de eventos de emergencias en costa rica: pérdidas, personas afectadas e indicadores asociados. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 1. Enero-Marzo, 2026. Pág. 41-55.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i1.7889

1 Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
eric.mata@ucr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0001-8592-0671
2 Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
armando.briceno@ucr.ac.cr
https://orcid.org/0009-0009-2544-949X

Palabras clave

Eventos de emergencia; pérdidas; indicadores; Costa Rica.

Resumen

Este artículo examina la capacidad de respuesta del sistema de Costa Rica y la cuantificación de impacto ante emergencias, analizando datos históricos de declaratorias de emergencia entre 2005 y 2023. Se utilizan las bases de datos abiertas de la CNE para valorar y comparar los eventos de emergencia, cuantía de pérdidas, sectores afectados y los patrones asociados a los eventos con declaratoria de emergencia. Se identificaron un total de 38 declaratorias de emergencia emitidas durante el período analizado, con un predominio notable de eventos hidrometeorológicos (68%). Este tipo de emergencias no solo es la más frecuente, sino que también ha sido responsable de las mayores pérdidas económicas, representando un 5,4% del Producto Interno Bruto (PIB) promedio del país. Se cuantifican las pérdidas económicas, con un total de ₡2.341 miles de millones, siendo el sector de carreteras y puentes el más afectado (33% del total de pérdidas), mientras que en términos geográficos, las regiones del Pacífico y Zona Norte son sobre las que se han emitido el mayor número de declaratorias, lo que resalta su vulnerabilidad ante estos eventos. Se hace hincapié en la necesidad de contar con un sistema robusto de gestión de emergencias que no solo responda eficazmente a crisis, sino que también permita una mejor planificación y asignación de recursos. Este enfoque se vuelve crucial para aumentar la resiliencia de la infraestructura y mitigar el impacto económico sobre la población, donde las pérdidas anuales pueden oscilar entre el 7% y el 20% con respecto al PIB destinado a sectores clave como educación y salud.

Keywords

Emergency events; losses; indicators; Costa Rica.

Abstract

This article examines Costa Rica's response capacity and impact quantification in emergencies, analyzing historical data on emergency declarations from 2005 to 2023. Open databases from the National Emergency Commission (CNE) are used to assess and compare emergency events, the extent of losses, affected sectors, and patterns associated with declared emergencies. A total of 38 emergency declarations were identified during the analyzed period, with a notable predominance of hydrometeorological events (68%). This type of emergency is not only the most frequent but also responsible for the largest economic losses, representing 5.4% of the country's average Gross Domestic Product (GDP). Economic losses were quantified at ₡2.341 billion, with the road and bridge sector being the most affected (33% of total losses). Geographically, the Pacific and Northern regions had the highest number of declarations, highlighting their vulnerability to these events. The article emphasizes the need for a robust emergency management system that not only responds effectively to crises but also enables better planning and resource allocation. This approach is crucial to increasing infrastructure resilience and mitigating the economic impact on the population, where annual losses can range from 7% to 20% of the GDP allocated to key sectors such as education and health.

Introducción

En los últimos años, Costa Rica ha enfrentado una serie de desafíos marcados por diversos eventos de emergencia que han puesto a prueba la capacidad de respuesta, planificación y resiliencia del país. Debido a su geografía, el país es propenso a eventos de naturaleza hidrometeorológica, sísmica, actividad volcánica y deslizamientos. Estos incidentes han generado un impacto en la población afectada, causando daños en infraestructura y, lamentablemente en algunos casos, resultando en la pérdida de vidas humanas.

El presente artículo tiene como finalidad analizar las pérdidas, personas afectadas y los patrones o indicadores asociados a aquellos eventos en los que se emitió una declaratoria de emergencia para hacer frente a la situación. A través de un análisis de datos, es posible determinar cuáles eventos han conllevado mayores costos y cuál sector ha requerido la inversión más significativa. El análisis presentado tiene como propósito facilitar el desarrollo de estrategias de prevención y de asignación de recursos, basándose en la experiencia adquirida a lo largo de los acontecimientos ocurridos en el país en los últimos años.

Antecedentes

La Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) ha mantenido un registro histórico sobre eventos de origen natural y antrópico en el país desde el año 1723, según lo detallan Vallejos et al. en compendios publicados en el año 2012 [1] y en 2017 [2].. Estos registros históricos tienen como papel proporcionar una caracterización de los eventos, incluyendo su magnitud, los lugares afectados y su impacto correspondiente.

En relación con algunos de los eventos más recientes y en consonancia con la política de transparencia de la CNE, la institución dispone de un resumen de daños y pérdidas desglosado por año, tipo de evento, tipología de sector y cantón, abarcando el período desde 2005 hasta 2023.

Adicionalmente, es importante destacar que el tema de la gestión de riesgo y la respuesta a emergencias tradicionalmente ha sido abordado a través de un enfoque centrado en la vulnerabilidad de las zonas bajo amenaza o mediante el análisis de casos específicos de estudio. No obstante, en 2022, se publicó una investigación de base para el Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible, realizada por Orozco-Montoya y Brenes-Maykall [3], quienes examinaron una serie de situaciones de emergencia y su correlación con el desarrollo humano durante el transcurso de 2021 y el inicio de 2022. Además, en ese mismo año se publicó un artículo elaborado por Orozco et al. [4] el cual caracteriza tendencias y comportamientos de desastres en Costa Rica a partir de la base de datos DesInventar. Es relevante destacar que esta investigación constituye uno de los antecedentes más afines al análisis que se detalla en el presente artículo.

Tanto Costa Rica, como la región de Centroamérica comparten una realidad: la recurrencia de eventos naturales que ponen a prueba la resiliencia de sus poblaciones. Terremotos, huracanes, erupciones volcánicas y deslizamientos de tierra son fenómenos que azotan con frecuencia la región, causando pérdidas humanas, económicas y sociales significativas [5]. La infraestructura pública y privada sufre daños considerables, lo que paraliza actividades económicas, afecta la calidad de vida de los habitantes y genera una carga financiera importante para los gobiernos.

Marco teórico

el artículo 4 de la Ley Nacional de Emergencias y Prevención de Riesgos N°8488 [6], define la gestión de riesgo como un proceso en el cual se revierten las condiciones de vulnerabilidad de la población, infraestructura y actividades productivas. Este modelo integra criterios eficaces de prevención y mitigación de desastres en la planificación territorial y socioeconómica, así como en las fases de preparación, atención y recuperación ante situaciones de emergencia.

Dentro de este contexto, la misma ley define una emergencia como una situación de crisis generada por un desastre, que requiere de acciones inmediatas para proteger vidas, bienes y prevenir el sufrimiento humano. Debido a lo anterior, en Costa Rica se crea la CNE (Ley N°8488), como entidad rectora en lo que se refiere a atención de riesgos y a los preparativos para atender situaciones de emergencia.

Para atender estas necesidades urgentes e imprevistas, el Poder Ejecutivo tiene la potestad extraordinaria de declarar estado de emergencia, lo cual permite, mediante un régimen de excepción, otorgar fondos o variar el destino de recursos públicos para la atención de estos eventos, con mecanismos ágiles y excepcionales. Por otra parte, el país cuenta también con una Política de Gestión del Riesgo [7] que, junto con el Plan de Gestión del Riesgo, constituyen un marco de orientación, a nivel estratégico, que contribuye a enfrentar los retos propios de un país que está expuesto a las amenazas naturales.

Algunos estudios internacionales, como la Campaña de Ciudades Resilientes de Naciones Unidas, plantea que los desastres: “no son el resultado de la manifestación de las amenazas, sino de las condiciones de vulnerabilidad por condiciones e intervenciones de los sectores sociales en términos económicos, culturales, sociales, educativos, técnicos y ambientales” [8]. De acuerdo con esta visión, se busca superar una visión reactiva de la atención de la emergencia, para adoptar una visión proactiva de prevención y gestión del riesgo por desastres, a través de políticas públicas. La CNE no sólo busca tener una participación de primera respuesta a los hechos consumados de las emergencias, sino que también pretende promover una política proactiva de gestión de riesgo como eje transversal de los programas de las instituciones del estado costarricense. Para ello, según explica Mesén [9], se ha trabajado en conjunto con el MEP para desarrollar programas educativos en el tema de la gestión del riesgo en desastres.

La normativa y políticas de la CNE permiten estructurar un sistema de instituciones, y de gobiernos locales, que se organizan para atender las materias de prevención y de la atención de emergencias, y es precisamente durante un evento, que genere una alerta de cierto nivel de seriedad para la población (alerta según color), o una emergencia nacional, que estas instancias se activan y despliegan su capacidad de evaluación de daños. La ley de Emergencias instruye a todas las instancias que colaboran la CNE, a llevar a cabo esfuerzos, fuera de sus operaciones habituales, y a que ejecuten levantamientos y evaluaciones de daño, durante la Emergencia. A través de estos informes de evaluación y cuantificación de daños, es que la CNE es capaz de contar con estimaciones económicas de daños y sus ubicaciones geográficas, en el plazo que establece la ley, para finalmente elaborar un documento llamado “Plan de la emergencia”.

Metodología

Para el desarrollo del presente artículo se empleó una metodología dividida en distintas fases, las cuales se describen a continuación:

En primera instancia se llevó a cabo una revisión de políticas y normativas referentes a gestión de riesgo y atención de emergencias, para así conocer la injerencia de distintos actores en el proceso y posibles fuentes de información para el análisis.

Posteriormente, se procedió con la recopilación de información y revisión de decretos de emergencia para conocer los detalles de los eventos ocurridos y la forma en que se cuantificaron los daños. El compendio de la información presentada en dichos decretos se consultó en la base de datos abiertos de la CNE, que fue el insumo principal para el análisis de este artículo. Dicha base de datos posee una interfaz gráfica que permite visualizar la información disponible y filtrar los datos según se requiera, con lo cual fue posible generar extracciones de información a la medida de la investigación. Así, se obtuvo la información para los distintos parámetros de interés de este artículo, los cuales fueron: cantidad de declaratorias de emergencia por año, categoría de evento y región geográfica, además de las pérdidas por sectores.

Por último, se procesó la información extraída y para complementar el análisis se realizó el cálculo de razones e indicadores, y se elaboraron figuras o mapas para visualizar espacialmente los parámetros de carácter geográfico de interés.

Dentro de las limitaciones para el desarrollo del presente artículo es que no se pudo tener acceso a los planes de emergencia de la totalidad de eventos registrados en el período de análisis para revisar a mayor profundidad las acciones tomadas en cada caso. Adicionalmente, el presente análisis no cuantifica todos aquellos eventos que no llegaron a requerir una declaratoria de emergencia.

Por otra parte, la cantidad de años de análisis estuvo limitada por la información disponible en la base de datos abiertos de la CNE la cual registra las declaratorias de emergencia a partir del año 2005. Al no contar con una serie histórica más amplia, el alcance del análisis se ve restringido, puesto que, disponer de datos de un período mayor permitiría realizar interpretaciones e identificar tendencias con mayor precisión sobre la ocurrencia de emergencias en el país.

Resultados, análisis y discusión

A partir de la revisión de la serie de estadísticas y registros de la Comisión Nacional de Emergencias, durante el período comprendido de 2005 a 2023 [10], se determinó que en total se emitieron 38 declaratorias de emergencia, de las cuáles 7 todavía están vigentes a fecha del mes de marzo de 2025. De este total, se tienen los siguientes resultados:

Cantidad de declaratorias de emergencia

Por año, se emitió un promedio de 2,00 declaratorias de emergencia, siendo el año 2005 el de mayor número con un total de 6, mientras que en los años 2011, 2013 y 2018, no se emitió ninguna declaratoria. El gráfico de la Figura 1 muestra la cantidad de declaratorias por año para el período analizado.

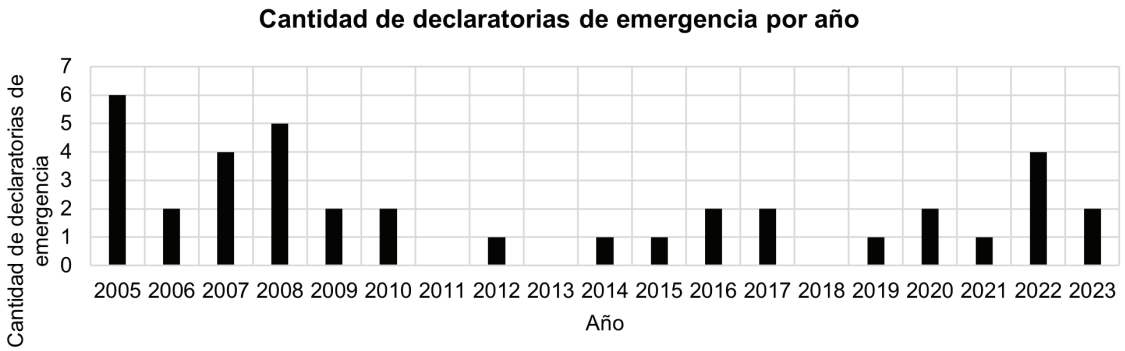


Figura 1. Gráfico de cantidad de declaratorias de emergencia por año.

Si se diferencia por categoría, predominan notoriamente las declaratorias de emergencia provocadas por eventos de tipo hidrometeorológico, siendo un total de 26 declaratorias, lo cual porcentualmente representa un 68% del total emitidas en el período de análisis, incluyendo situaciones provocadas por precipitaciones intensas, fuertes vientos o sequías principalmente. Mientras que, en segundo lugar, destacan eventos de tipo biológico, con 4 declaratorias (11% del total), vinculadas a situaciones provocadas por el dengue o la pandemia del COVID-19.

En el gráfico de la Figura 2 se puede observar con mayor detalle, la distribución porcentual por cada categoría de evento.



Figura 2. Gráfico de declaratorias de emergencia por categoría de evento.

Frecuencia y período de retorno de los eventos

La frecuencia de ocurrencia de un evento es un parámetro de interés que se puede obtener a partir de la cantidad de declaratorias de emergencia emitidas. En este caso, el análisis realizado considera un plazo de 18 años que va desde 2005 a 2023. Así, en el cuadro 1 se muestra los resultados obtenidos con la información del período de análisis por categoría de evento en la cual se detalla la frecuencia y el período de retorno en el que sucede cada tipo de evento.

Cuadro 1. Frecuencia y período de retorno por categoría de evento.

Categoría de evento	Cantidad de declaratorias de emergencia	Frecuencia (eventos/año)	Período de retorno (sucede 1 vez cada X años)
Hidrometeorológico	26	1,44	0,69
Geológico	2	0,11	9,00
Biológico	4	0,22	4,50
Antropogénico	2	0,11	9,00
Antrópico	3	0,17	6,00
Tecnológico	1	0,06	18,00

Según los resultados del cuadro 1 se aprecia que los eventos que se repiten con mayor frecuencia son los de tipo hidrometeorológico para los cuáles se emite al menos una declaratoria de emergencia por año. Estos eventos compuestos por tormentas y huracanes son los fenómenos atmosféricos que más daños causan a Costa Rica, según el IMN [11], ya sea por inundaciones severas, derrumbes o deslizamientos. Los huracanes que se forman en el mar Caribe llegan a afectar frecuentemente el litoral del Pacífico costarricense, debido a los patrones de circulación de vientos y del movimiento de la zona de convergencia intertropical existente en el país.

En segundo lugar, los eventos de tipo biológico, los cuáles se repiten aproximadamente cada 4,50 años.

Por otra parte, los eventos de tipo tecnológico son los que se han presentado en menor cantidad de ocasiones ya que sólo se ha registrado un evento a lo largo de todo el período de análisis. Sin embargo, es importante considerar que, dado el auge en los avances tecnológicos y el aumento de dependencia sobre la misma, no se puede descartar que la frecuencia de ocurrencia de este tipo de eventos aumente en el futuro.

Pérdidas por sectores

En cuanto a los principales sectores afectados, la serie de datos propone 30 tipologías de sectores distintos; sin embargo, para efectos de este artículo se decidió combinar tipologías similares para así reducir la cantidad a 14 sectores. En total se estima un total de ₡ 2 341 miles de millones en pérdidas, de las cuáles, la mayor cantidad de recursos se destinó en atender carreteras y puentes, lo cual representó aproximadamente un 33% del total del presupuesto destinado a la atención de las emergencias. Seguido por atención de ríos, alcantarillas y obras correctivas con un 19%, y en tercer lugar asistencia social con un 11%.

En el cuadro 2 se resumen la cantidad de millones de colones invertidos por sector.

Cuadro 2. Resumen de pérdidas por sectores.

Sector	Pérdidas (en millones)
Carreteras y puentes	₡ 765 281,78
Ríos, alcantarillas y obras correctivas	₡ 449 033,36
Asistencia social	₡ 250 523,73
Sistemas eléctricos y de energía	₡ 207 283,05
Agropecuario y sistemas de riego	₡ 193 544,52
Vivienda	₡ 155 818,36
Sistemas de agua y ambiente	₡ 103 836,84
Edificios públicos y centros educativos	₡ 74 426,01
Salud, higiene y protección	₡ 62 422,15
Primer impacto, logísticas y operaciones de emergencia	₡ 25 715,88
Actividad productiva y empresarial	₡ 22 514,07
Tecnológico e infocomunicaciones	₡ 16 774,24
Ferrovías y aeródromos	₡ 12 551,07
Obras diversas y personal	₡ 1 897,56

Además, como dato de interés, se pudo estimar que las pérdidas anuales reportadas en el sector vivienda alcanzan un valor equivalente de 5% a un 15% del presupuesto anual del BANHVI (ente financiador de proyectos de vivienda) durante los años de estudio. Este dato es importante porque pone en perspectiva la magnitud del impacto respecto a la inversión social que lleva el país cada año.

Afectación por regiones y cantones

Al extraer la información de declaratorias de emergencia por cantón, es posible visualizar gráficamente los resultados según el mapa de calor de la Figura 3.

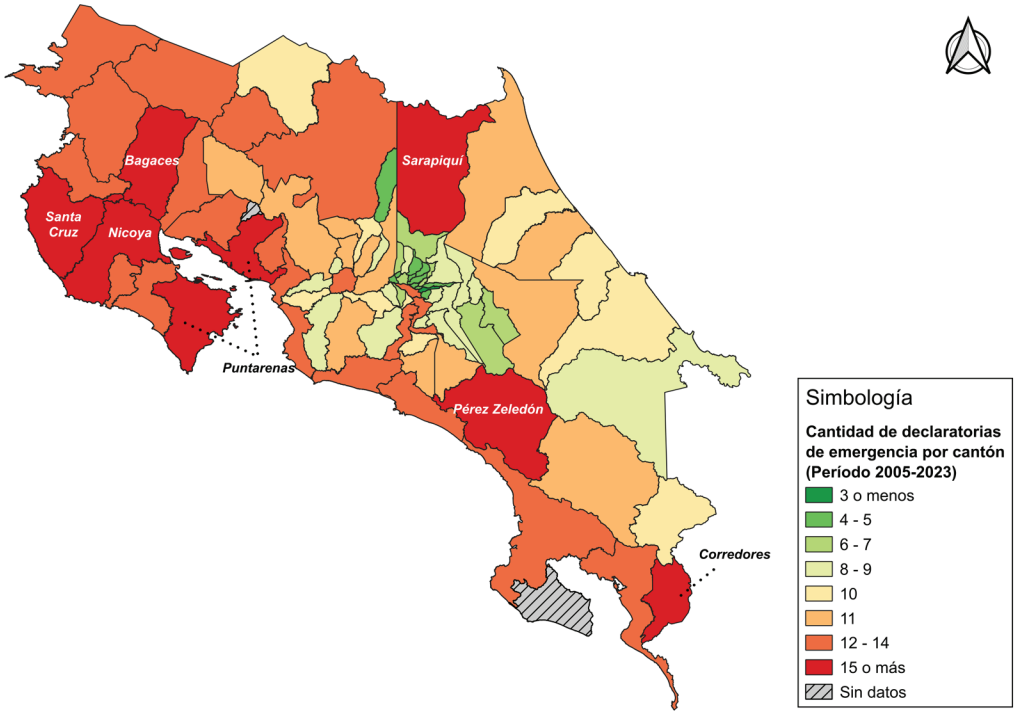


Figura 3. Mapa de cantidad de declaratorias de emergencia por cantón.

A partir de la distribución geográfica del país y según lo mostrado en la Figura 3, la mayor cantidad de declaratorias de emergencia se han emitido para cantones de la región Pacífico Norte, específicamente 16 declaratorias en el cantón de Puntarenas y 15 en los cantones de Bagaces, Santa Cruz y Nicoya. Por otra parte, se resaltan puntos de interés en la región Brunca, específicamente en los cantones de Corredores y Pérez Zeledón, en los cuáles también se emitieron 15 declaratorias de emergencia y sobresale también en la Región Huetar Norte el cantón de Sarapiquí con esta misma cantidad de declaratorias.

En contraparte, los cantones donde menor cantidad de declaratorias de emergencia se emitieron (3 o menos) se ubican en la región Central del país, específicamente en el sector de Heredia y cantones del norte y este de la provincia de San José. Es importante aclarar, que no se contabilizan declaratorias de emergencia en los cantones de Monteverde y Puerto Jiménez, dado que estos fueron creados en períodos posteriores al estudio. Previamente estos correspondían a distritos de los cantones de Puntarenas y Golfito, respectivamente.

Si se analiza la distribución geográfica por categoría de evento, se obtienen los mapas mostrados en la Figura 4 para eventos hidrometeorológicos (lado izquierdo) y para eventos geológicos (lado derecho). Resultan de particular interés este tipo de eventos por la incidencia que tienen a nivel de daños en edificaciones e infraestructura.

Según se muestra en la Figura 4, la vertiente Pacífica es sobre la que mayor cantidad de declaratorias de emergencia se han emitido. Particularmente destacan los cantones que conforman la Península de Nicoya; la zona de Puntarenas y el Pacífico Central; Pérez Zeledón y Corredores en la Región Brunca; San Carlos, Upala y Guatuso en la Región Huetar Norte; y los cantones de Aserrí y Desamparados en la Región Central del país.

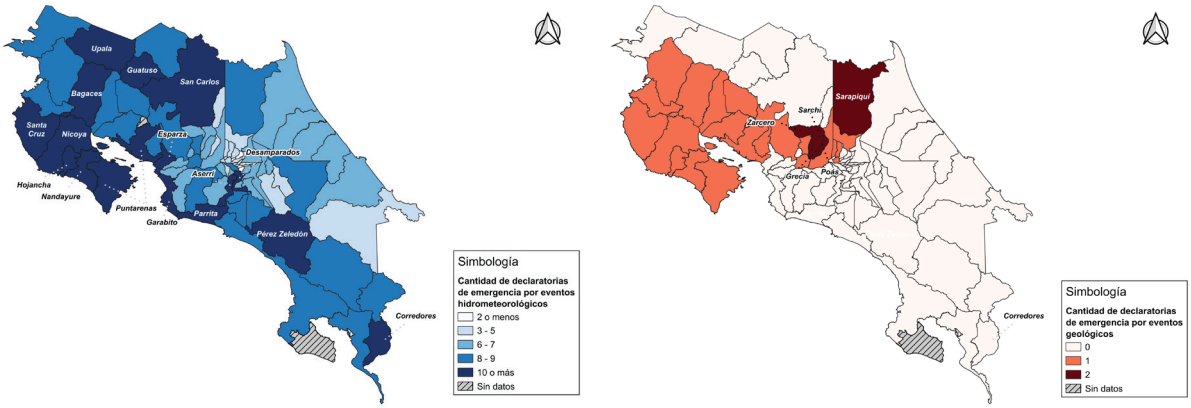


Figura 4. Cantidad de declaratorias de emergencia por eventos hidrometeorológicos y geológicos.

Por otra parte, al analizar los datos sobre eventos geológicos, se aprecia que estos son menos comunes, sin embargo, la mayor cantidad de declaratorias de emergencia en estos casos se concentra en la Región Occidental del Valle Central, particularmente los cantones de Zarcero, Sarchí, Grecia y Poás, los cuales se vieron afectados por los eventos sísmicos de Cinchona en el año 2009 y Sámara en el año 2012. Resalta también el cantón de Sarapiquí y algunos cantones de la provincia de Guanacaste, Alajuela y Heredia.

Pérdidas con respecto al PIB y otros indicadores

Otra manera de dimensionar el impacto que generan las pérdidas producto de la atención de las emergencias es mediante la comparación con el Producto Interno Bruto (PIB) del país.

A partir de datos publicados en el compendio de datos estadísticos del Programa Estado de la Nación [12], se determinó que el PIB Promedio real para el período de análisis 2005-2023 fue de 30 606 miles de millones de colones. Con este insumo, si se compara el total de pérdidas por categoría de evento en relación con el PIB Promedio, se logra determinar que para atender los eventos hidrometeorológicos se ha destinado un total del 5,4% del PIB Promedio, seguido por eventos de tipo biológico y geológico con un 1,1% del PIB Promedio cada uno. El cuadro 3 resume los resultados obtenidos por cada categoría de evento.

Cuadro 3. Pérdidas totales por categoría de evento en relación con el PIB Promedio (período 2005-2023).

Categoría de evento	Pérdidas (miles de millones)	Porcentaje de pérdidas con relación al PIB Promedio
Hidrometeorológico	₡ 1 638,35	5,35%
Biológico	₡ 336,07	1,10%
Geológico	₡ 330,77	1,08%
Tecnológico	₡ 16,51	0,05%
Antropogénico	₡ 14,90	0,05%
Antrópico	₡ 3,73	0,01%

Si se analiza las pérdidas por año en comparación con el valor del PIB real de cada año se obtuvo los resultados mostrados en el gráfico de la Figura 5. Se aprecia que el período 2020 fue aquel en que las pérdidas representaron los porcentajes más altos del PIB de dicho año, seguido por el período 2009 y 2017. Cada uno resalta por ser años en los que se presentaron eventos de emergencia bastante significativos, como lo fue la pandemia de COVID-19 en el año 2020, el terremoto de Cinchona en 2009 y la tormenta Nate en 2017. Por otra parte, en 2011, 2013 y 2018 no se emitieron decretos de emergencia, por lo que no se tiene un registro de pérdidas.



Figura 5. Gráfico de porcentaje de pérdidas respecto al PIB anual.

Para determinar el impacto sobre la población, se tomó en cuenta el valor de las pérdidas con respecto a la cantidad de habitantes del país por cada año. El comportamiento anual es similar al mostrado en la Figura 6, con un valor máximo obtenido en el año 2020, seguidos por los periodos 2009 y 2017, y con un registro de tres años sin pérdidas correspondientes a los períodos 2011, 2013 y 2018. Para resumir los resultados, en los siguientes recuadros se indican el valor mínimo de pérdidas por habitante, el valor promedio y el valor máximo en el período de análisis.

Valor mínimo	Valor promedio	Valor máximo
₡ 2 599,21	₡ 30 449,32	₡ 91 051,92

Al segregar por tipo de evento, se estimó el promedio anual de pérdidas en el período de análisis. Así, se obtuvo que los eventos de tipo geológicos fueron los que en promedio generaron la mayor cantidad de pérdidas con un total de 165 383,50 millones de colones, seguidos por los eventos hidrometeorológicos con un valor promedio anual de 117 025,00 millones de colones. En contraparte, los eventos antrópicos fueron los menos costosos, generando pérdidas promedio anuales de 1 863,50 millones de colones. El cuadro 4 muestra los valores para cada categoría o tipo de evento.

Cuadro 4. Pérdidas promedio anuales por categoría de evento (período 2005-2023).

Categoría de evento	Pérdidas (millones)
Geológico	₡ 165 383,50
Hidrometeorológico	₡ 117 025,00
Biológico	₡ 112 024,00
Tecnológico	₡ 16 508,00
Antropogénico	₡ 14 900,00
Antrópico	₡ 1 863,50

Como últimos puntos de comparación, se calculó la relación entre el porcentaje de pérdidas por año y el porcentaje del PIB anual destinado a Educación, Salud y Vivienda. De esta manera se logra definir una referencia de cuánto representaron las pérdidas por atención de eventos de emergencia en función de estos parámetros. Los resultados se muestran en los siguientes recuadros:

Porcentaje en términos de PIB destinado a EDUCACIÓN	Porcentaje en términos de PIB destinado a SALUD	Porcentaje en términos de PIB destinado a VIVIENDA
6,7 %	**7,0 %**	**20,5 %**

Se aprecia que, en términos de Salud y Educación, el porcentaje de pérdidas es bastante similar, cercano al 7%. Mientras que, en términos de Vivienda, esta relación es mayor, con un valor de 20,5%.

Personas afectadas

El gráfico de la Figura 6 muestra la cantidad estimada de personas afectadas para distintos eventos hidrometeorológicos y geológicos, considerando la información disponible en los Planes Generales de la Emergencia. Las cifras son aproximadas e incluye a personas afectadas de forma directa, indirecta, albergados, movilizados, fallecidos y heridos.

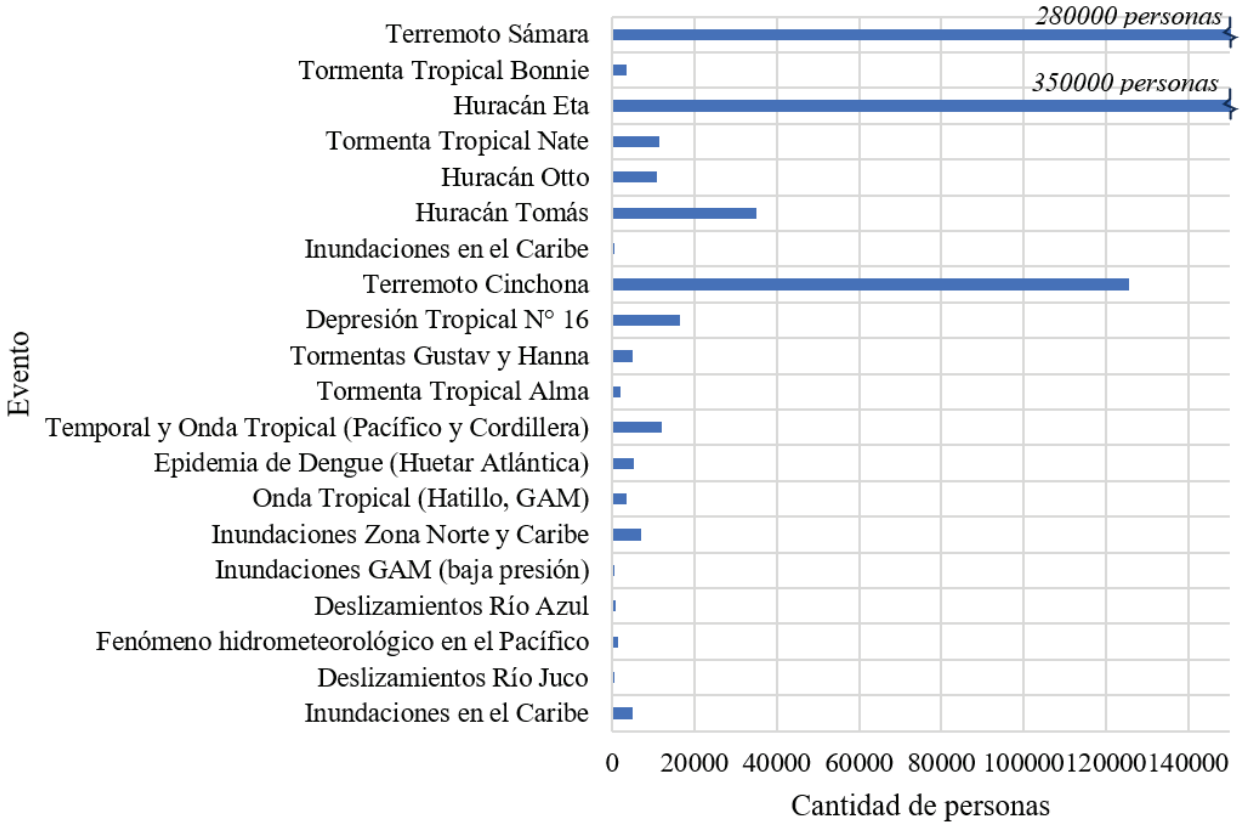


Figura 6. Estimación de personas afectadas por evento.

A partir de los resultados del gráfico anterior se observa que, aunque los eventos geológicos como los terremotos de Cinchona y Sámara son menos frecuentes, han generado las mayores cifras de personas afectadas, superando ambos los 100 000 afectados debido a daños en viviendas y la interrupción de servicios públicos. En contraste, los eventos hidrometeorológicos tienden a tener un menor impacto, con menos de 20 000 personas afectadas por evento en la mayoría de los casos, salvo excepciones notables como el Huracán Eta en 2020, que registró la cifra más alta de personas afectadas y el Huracán Tomás en 2010. Esta diferencia sugiere que, si bien los eventos geológicos son menos recurrentes, su capacidad destructiva sobre infraestructura y asentamientos humanos ha sido significativamente mayor en el país.

Comparación con países vecinos

Se llevó a cabo un análisis comparativo con la región, para lo que se utilizó la información provista por el Programa Estado de la Nación (PEN) en su estudio llamado Informe Estado de la Región 2021 [13], que permitió tener acceso a un análisis de los eventos de emergencia en Centroamérica. La información que sustenta gran parte de este estudio proviene de la Base de Datos DesInventar, un sistema de gestión de información de desastres construido por la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR). Al integrar y contrastar los hallazgos con los datos regionales obtenidos por el PEN de esta fuente, se busca ofrecer una perspectiva sobre tendencias en las tipologías de los desastres.

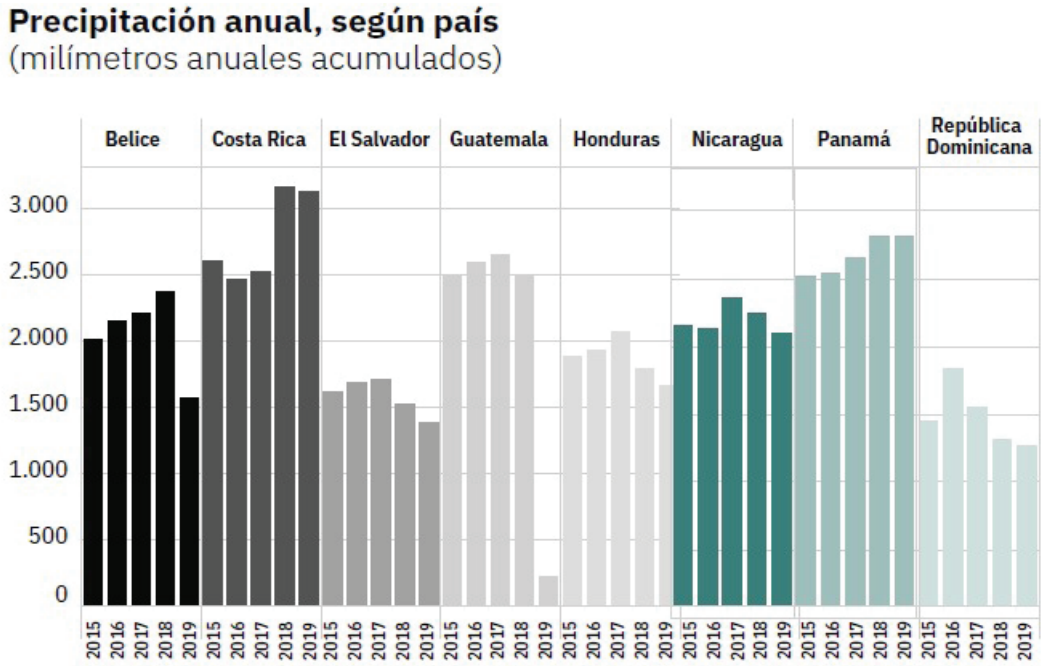


Figura 7. Precipitación anual por país [13].

La Figura 8 es un comparativo sobre los niveles promedio de precipitaciones anuales con una marcada diferencia regional. Costa Rica destaca al registrar las mayores precipitaciones de la región, superando a su seguidor, Panamá, en aproximadamente 300 milímetros (mm). Esta alta incidencia de lluvias es congruente con la predominancia de alertas y emergencias hidrometeorológicas en el país.

Cantidad de desastres registrados en DesInventar, según país y tipo. 1950 – 2020

	Tipo de evento							
País	Inundación	Deslizamiento	Sequía	Terremoto	Aluvión	Erupción volcánica	Tornado	Total
Costa Rica	8.699	3.901	439	374	251	45	1	13.710
El Salvador	2.192	1.162	195	608	177	148	1	4.483
Honduras	2.655	679	700	209	40	1	6	4.290
Guatemala	1.554	1.627	26	239	361	68	3	3.878
Panamá	1.903	625	15	72	1	0	9	2.625
Nicaragua	467	47	112	14	83	8	28	759
República Dominicana	464	34	160	16	12	0	0	686
Belice	29	0	0	1	0	1	0	31
Total	**17.963**	**8.075**	**1.647**	**1.533**	**925**	**271**	**48**	**30.462**

Figura 8. Desastres registrados por país y por tipo [13].

Al analizar la cantidad de desastres registrados en la región, según Figura 9, la base de datos DesInventar evidencia que Costa Rica reporta una cantidad significativamente mayor, llegando a triplicar la cifra de los demás países. Esta disparidad podría interpretarse como el resultado de un sistema de detección y reporte robusto en Costa Rica, basado en una legislación que obliga a diversas instituciones, nacionales y locales, a realizar levantamientos de datos y a reportarlos en períodos definidos. No obstante, al analizar las tendencias regionales, se confirma que los eventos hidrometeorológicos son los mayoritarios en toda Centroamérica. Al igual que en Costa Rica, estos eventos alcanzan y superan el 50% del total de todos los sucesos de emergencia reportados.

Finalmente, al profundizar en la tipología de desastres más frecuentes, la Figura 9 del análisis ilustra un patrón regional consistente. Las inundaciones, los deslizamientos, las sequías y los terremotos se posicionan, en ese orden, como los cuatro tipos de eventos de emergencia más reportados en la región, con muy pocas excepciones.

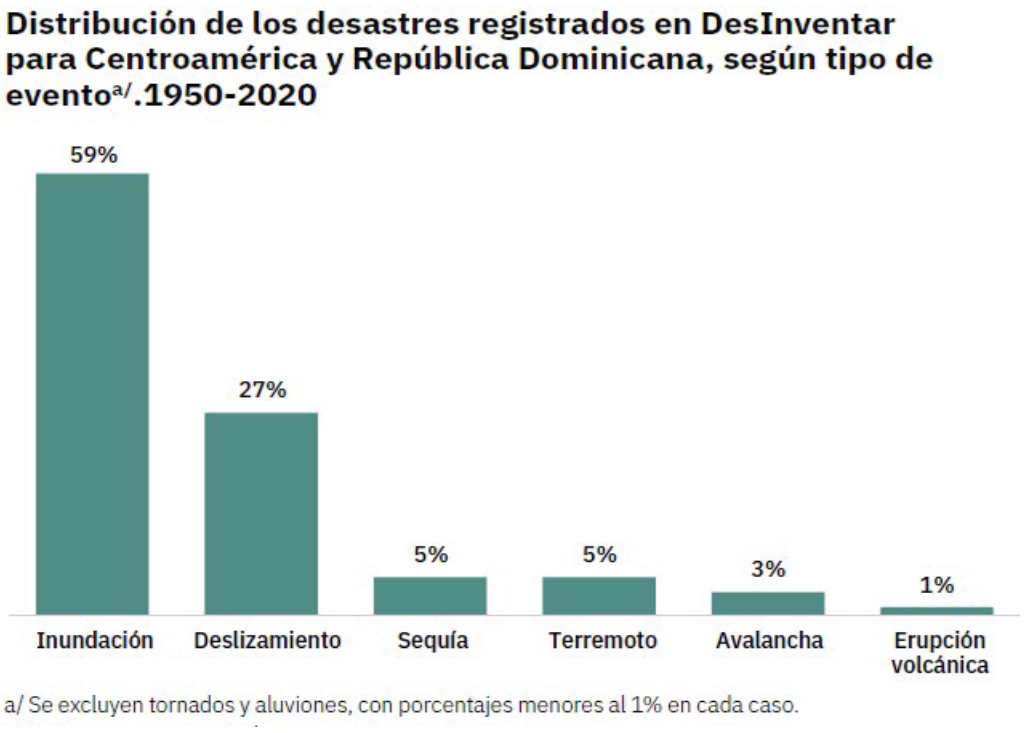


Figura 9. Distribución porcentual de los desastres por tipo, en la región [13].

Los patrones uniformes que se extraen de estas gráficas permiten pensar que, más allá de la variabilidad en la capacidad de registro y precipitación, la amenaza sísmica y la combinación de eventos hidrometeorológicos y geológicos menores (como deslizamientos) representan un desafío recurrente y estructural para la gestión del riesgo de desastres en Centroamérica y el comportamiento de Costa Rica no difiere de ese patrón.

Conclusiones

En conclusión, el análisis realizado evidencia la importancia de contar con un sistema de gestión y atención de emergencias robusto, que no solo permita atender de manera eficaz las situaciones críticas, sino que también facilite la recopilación y análisis de datos para la toma de decisiones informadas. Durante el período analizado, se registraron un total de 38 declaratorias de emergencia, de las cuales 26 estaban relacionadas con eventos hidrometeorológicos, con una frecuencia promedio de 1,44 declaratorias por año, siendo este el tipo de evento más frecuente y que representó las mayores pérdidas económicas. Aunque, en promedio, los eventos geológicos presentaron las mayores pérdidas económicas por evento individual.

La infraestructura fue el sector más afectado, destinándose la mayor cantidad de recursos a la reparación de carreteras, puentes, ríos, alcantarillas y obras correctivas. Esta situación subraya la necesidad de ajustar los parámetros de diseño de infraestructura para que las construcciones sean más resilientes, especialmente ante eventos hidrometeorológicos, cuya frecuencia e intensidad podrían aumentar debido al cambio climático.

Geográficamente, las regiones del Pacífico y la zona Huetar Norte concentraron la mayor cantidad de declaratorias de emergencia, tanto a nivel general como por eventos específicos en el período de análisis, reflejando su alta vulnerabilidad. Además, se determinó que las pérdidas económicas por eventos extremos equivalen en promedio a 30,000 colones por habitante, con años críticos como 2020, 2009 y 2017 destacándose por un gasto particularmente elevado.

Finalmente, al comparar las pérdidas económicas con sectores como Educación, Salud y Vivienda, se evidenció que estas representan de un 7% hasta un 20% del porcentaje del PIB destinado a dichos sectores. Lo que enfatiza el impacto de estos eventos en la economía nacional y la urgencia de integrar estrategias de gestión del riesgo que minimicen los daños y pérdidas en la medida de lo posible.

Referencias

[1] S. Vallejos Vásquez, L. Esquivel Valverde y M. Hidalgo Madrigal, Histórico de desastres en Costa Rica (Febrero 1723 - Setiembre 2012), San José, CR: CNE, 2012.

[2] S. Vallejos Vásquez, L. Esquivel Valverde y M. Hidalgo Madrigal, Histórico de desastres en Costa Rica: febrero 1723 - abril 2017, 2nd ed., San José, C.R.: CNE, 2017.

[3] R. Orozco Montoya y A. Brenes Maykall, Gestión del riesgo en Costa Rica: desafíos e impactos para el desarrollo humano sostenible, San Jose´, C.R.: CONARE - PEN, 2022.

[4] R. Orozco-Montoya, A. Brenes-Maykall y R. Sura-Fonseca, «Inventario histórico de desastres en Costa Rica en el periodo 1970-2020,» Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del RIesgo de Desastres REDER, nº 6 (1), pp. 66-82, 2022.

[5] Consorcio Evaluación de Riesgos Naturales América Latina, «Costa Rica: Tomo II Análisis probabilista de amenazas y riesgos naturales. Informe técnico ERN-CAPTRA-T2-1. Revisión de eventos históricos importantes,» CAPRA, 2012.

[6] Costa Rica, Leyes y Decretos, «Ley N°8488: Ley Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo,» Gaceta N°8 del 11 de enero, 2006, San José, Costa Rica, 2006.

[7] CNE, «Política Nacional de Gestión de Riesgo 2016-2030,» La Comisión, San José, CR, 2015.

[8] L. Romero, «Escenario de amenazas en el cantón central de San José,» Oficina de Prevención y Atención de Desastres, Municipalidad de San José., San José, Costa Rica, 2012.

[9] C. Mesén Rojas, «El sector educación de Costa Rica en la gestión del riesgo: El caso del Ministerio de Educación Pública y la CNE (1986-2018),» Revista en Torno a la Prevención, pp. 31-42, 2020.

[10] CNE, «Sistema de Seguimiento y Monitoreo. Histórico de pérdidas Costa Rica 2005-2023,» [En línea]. Disponible: https://cne.go.cr/transparencia/datos_abiertos.aspx.

[11] IMN - Instituto Meteorológico Nacional, «Los huracanes y sus efectos en Costa Rica,» IMN, 31 Octubre 2023. [En línea]. Disponible: https://www.imn.ac.cr/documents/10179/31306/9-LOS+HURACANES+Y+LOS+EFECTOS+EN+COSTA+RICA/dce06c47-915f-4517-a001-30cbf6f890d9. [Último acceso: 25 Enero 2025].

[12] Programa Estado de la Nación, «Estadísticas,» [En línea]. Disponible: https://estadisticas.estadonacion.or.cr/.

[13] Programa Estado de la Nación, «Sexto Estado de la Región 2021 : versión ampliada,» CONARE - EPN, San José, C.R., 2021.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores declaramos que hemos utilizado las herramientas de inteligencia artificial ChatGPT y Gemini para asistirnos en la redacción de este artículo. Estas herramientas nos ayudaron a mejorar la estructura y la claridad del texto. Los contenidos generados por la IA fueron revisados minuciosamente por nosotros para asegurar su precisión y coherencia con el objetivo del estudio.

Evaluación preliminar de un sistema biológico eucariota (*Nicotiana tabacum*) escalable para la producción de insulina humana recombinante

Preliminary evaluation of a scalable eukaryotic biological system (*Nicotiana tabacum*) to produce recombinant human insulin

Carolina Centeno-Cerdas[1], Alina Jiménez-Rojas[2], Fabián Echeverría-Beirute[3], Montserrat Jarquín-Cordero[4]

Fecha de recepción: 5 de abril, 2025
Fecha de aprobación: 29 de julio, 2025

Centeno-Cerdas, C; Jiménez-Rojas, A; Echeverría-Beirute, F; Jarquín-Cordero, M. Evaluación preliminar de un sistema biológico eucariota (*Nicotiana tabacum*) escalable para la producción de insulina humana recombinante. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 1. Enero-Marzo, 2026. Pág. 56-73.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i1.7949

1 Centro de Investigación en Biotecnología, Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
ccenteno@tec.ac.cr
https://orcid.org/0000-0003-4600-8887
2 Centro de Investigación en Biotecnología. Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
alina.j.r@estudiantec.cr
https://orcid.org/0000-0002-1540-6551
3 Centro de Investigación y Desarrollo en Agricultura Sostenible para el Trópico Húmedo (CIDASTH). Escuela de Agronomía, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
fecheverria@itcr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0002-7238-220X
4 Centro de Investigación en Biotecnología, Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
mocordero@tec.ac.cr
https://orcid.org/0000-0001-7926-7290

Palabras clave

Diabetes; transformación genética; expresión génica; receptor de insulina; péptido señal.

Resumen

La diabetes mellitus es un problema de salud mundial cuyo tratamiento representa presión económica para los pacientes y los sistemas de salud pública. La producción de insulina, principal tratamiento de esta enfermedad es costosa y por ende se requieren métodos alternativos y económicos para aumentar su disponibilidad y efectividad para los pacientes. En este trabajo se emplearon plantas de tabaco (*Nicotiana tabacum*) como modelo biotecnológico para introducir genéticamente los genes requeridos para sintetizar y liberar insulina humana. Para ello, la secuencia codificante se clonó en casetes de expresión nuclear y plastidial para material vegetal y su correcta inserción se verificó mediante análisis de PCR del ADN genómico de los clones derivados. Además, se cuantificó la expresión y liberación de proteínas recombinantes mediante ELISA. La concentración alcanzó niveles promedio de 800pmol/L en los sobrenadantes de los derivados del constructo pAF_ins, lo que confirma la efectividad de la transformación plastidial. Para probar preliminarmente la bioactividad de la hormona, se evaluó su capacidad para inducir la fosforilación de su receptor en células HepG2. Los resultados mostraron un aumento en la fosforilación después de la estimulación tanto con insulina recombinante disponible comercialmente (control positivo), como con la molécula recombinante secretada por las plantas de tabaco. No se observó fosforilación al estimular las células con el medio de inanición (control negativo) o extractos de plantas silvestres. Los resultados muestran que *N. tabacum* es una plataforma viable y apropiada para la producción de insulina humana recombinante en su configuración funcional para aplicaciones terapéuticas.

Keywords

Diabetes; genetic transformation; gene expression; insulin receptor; signal peptide.

Abstract

Diabetes mellitus is a worldwide health problem, and its treatment represents economic pressure for patients and public health systems. Thus, it is important to develop alternatives to produce insulin, the main treatment for this disease, to reduce its price and increase its availability and effectiveness, which implies direct patient benefits. In this work, leaves of *Nicotiana tabacum* were genetically modified to synthesize and release human insulin. For this purpose, the coding sequence was cloned in nuclear and plastidial expression cassettes for plant material. Its correct insertion was verified by PCR analysis of the genomic DNA of the derived clones. In addition, recombinant protein expression and release were quantified by ELISA. The concentration reached average levels of 800pmol/L in the supernatants of the pAF_ins construct derivatives, confirming the effectiveness of plastidial transformation. To preliminarily assess the bioactivity of the hormone, its ability to induce phosphorylation of its receptor in HepG2 cells was evaluated. The results showed increased phosphorylation after stimulation with commercially available recombinant insulin (positive control) and the recombinant molecule secreted by tobacco plants. No phosphorylation was observed upon the stimulation of cells with starvation medium (negative control) or wild-type plant extracts. The results show that *N. tabacum* is a viable and appropriate platform to produce recombinant human insulin in its functional configuration for therapeutic applications.

Introducción

La diabetes mellitus es una enfermedad humana endocrina que afecta los niveles normales de glucosa en sangre debido a la deficiencia relativa o absoluta de insulina, resistencia a esta hormona, o disfunción de las células β (productoras de insulina endógena) [1]. Existen dos tipos de diabetes diagnosticados con frecuencia: diabetes mellitus tipo I y tipo II; sin embargo, existen otros más como la diabetes gestacional, diabetes monogénica y formas secundarias de diabetes o de intolerancia a la glucosa que son diagnosticadas con menor frecuencia en la población [2].

La diabetes se considera una pandemia global, puesto que, según datos de la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés), aproximadamente 537 millones de adultos entre 20 a 79 años están diagnosticados con diabetes y para 2045 se espera que esta cantidad ascienda a 634 millones, sin contar los casos subdiagnosticados [1, 3]. Para el año 2019, la diabetes mellitus fue la causa directa del fallecimiento de 1.5 millones de personas [4, 5]. Según la Dirección de Vigilancia del Ministerio de Salud de Costa Rica, para noviembre del 2023 se diagnosticó en promedio 20 personas diarias con esta condición [6]. El diagnóstico de diabetes y otras presentaciones de intolerancia a la glucosa por lo general se acompaña de coexistencia, en una misma persona, de una o varias enfermedades o trastornos asociados a una enfermedad primaria como hipertensión, dislipidemia, retinopatía, neuropatía, padecimientos cardiovasculares, cáncer, depresión e incluso susceptibilidad a condiciones infecciosas como tuberculosis, virus de inmunodeficiencia humana, SARs-Cov-2, entre otras comorbilidades[1, 7-12], lo cual representa una disminución en la calidad y esperanza de vida de los pacientes, así como una carga económica y social para el resto de la población. Dichas comorbilidades son evitables manteniendo la glicemia estable, lo cual se puede lograr mediante intervenciones psicosociales o terapéuticas, siendo estas últimas basadas principalmente en la administración de insulina.

La insulina es una hormona peptídica sintetizada en el páncreas por las células β de los islotes de Langerhans como pre-proinsulina. La proinsulina está compuesta por el péptido C unido al extremo N-terminal de la cadena A y al extremo C-terminal de la cadena B [13, 14], que adquiere su estructura tridimensional en el retículo endoplasmático (RE) y luego se transfiere al aparato de Golgi en donde se acumula en vesículas para separar el péptido C de las cadenas A y B mediante acción enzimática [13, 15, 16]. Una vez separado el péptido C, la insulina es biológicamente activa y liberada al torrente sanguíneo en respuesta a la entrada de glucosa a las células β del páncreas. Al ingresar, la glucosa es fosforilada y oxidada en adenosín trifosfato (ATP) en las mitocondrias [15]. El ATP generado produce una despolarización de la membrana, lo que conlleva a un aumento de Ca^{2+} intracelular y un cambio de voltaje, induciendo la secreción de insulina y su transporte a tejidos diana como hígado, músculo y tejido adiposo [15, 17].

El mercado global de insulina fue valorado en el 2023 en USD 19.19 billones, y se estima crecerá hasta alcanzar los USD 25.08 billones para el 2032. Diversas compañías farmacéuticas han desarrollado dicho medicamento como un análogo o como la insulina tradicional humana, por lo que, además de una alta demanda, el mercado tiene una oferta creciente que se estima sea del 3.1% [18].

Inicialmente, la insulina para fines terapéuticos se obtuvo de tejidos porcinos y bovinos, sin embargo, causaba reacciones adversas debido a la diferencia estructural y molecular con respecto a la insulina humana [19, 20], además de que presentaba bajo rendimiento, alto costo, e inquietudes bioéticas [21]. El desarrollo de la ingeniería genética permitió la producción de insulina en bacterias (*e.g. Escherichia coli*) y levaduras (*e.g. Saccharomyces cerevisiae, Pichia pastoris*), que han sido aprobadas para aplicaciones terapéuticas en humanos por la FDA [3, 19, 22, 23]. Estos sistemas de expresión presentan la ventaja de que su genoma está bien

caracterizado, presentan alta tasa metabólica y de crecimiento, y son rentables y fáciles de cultivar en biorreactor para su escalamiento [24, 25]. Sin embargo, son susceptibles a contaminación por endotoxinas, patógenos humanos, y no realizan modificaciones postraduccionales complejas requeridas para reproducir la bioactividad de la insulina humana [26, 27].

El producir insulina de secuencia humana en organismos eucariotas, como las plantas, representa una gran ventaja para los mercados, ya que podría mejorar su efecto terapéutico, disminución de efectos adversos, reducción de los tiempos y costos asociados y, por ende, mejorar la accesibilidad a una mejor calidad de vida para los pacientes. En el caso de específico de tabaco (*Nicotiana* sp), deferentes especies han sido usadas como modelo para procesos de mejoramiento genético [28], mediante técnicas como biobalística e infección por *Agrobacterium* [29]. *N. tabacum* permite la expresión estable de proteínas tanto en su genoma nuclear como plastidial, generando grandes cantidades de proteína soluble en comparación a otras especies vegetales [30]. Es una especie adaptable que no requiere condiciones especiales de cultivo [29], posee un ciclo de vida corto y al ser eucariota, realiza modificaciones postraduccionales complejas [30-32]. La expresión plastidial o citoplasmática permite gran acumulación de proteínas recombinantes, por lo que se ha convertido en una alternativa atractiva [33, 34]. La expresión nuclear presenta menor capacidad de acumulación, por lo que es usual añadir un péptido señal que dirija la proteína a otro compartimento subcelular para aumentar la acumulación, y evitar su degradación [32, 34]. *N. tabacum* se utiliza para la expresión de moléculas terapéuticas, vacunas y anticuerpos, dirigidos a enfermedades como cólera, ébola, cáncer, diabetes, rabia, hepatitis, y otras más para las que las moléculas recombinantes se encuentran en fase de ensayos clínicos corroborando su efectividad y seguridad [14, 30, 34]. La escalabilidad, rentabilidad, alta productividad y acumulación de proteína en los tejidos vegetales son definitivamente ventajosos del uso de tabaco como sistema de expresión [31, 33, 35]. Además, implica menores costos de extracción, recuperación y purificación de la proteína de interés debido a que se secreta en su forma biológicamente activa [1, 31, 35].

De esta manera, en el presente trabajo se buscó evaluar un sistema de producción de insulina en cloroplastos o núcleo de células de tabaco (*Nicotiana tabacum*), empleando dos péptidos señal distintos derivados de *Arabidopsis thaliana* y de *N. tabacum* para la secreción y recuperación eficiente y rentable de la hormona recombinante humana, realizando además pruebas preliminares para evaluar la factibilidad y escalabilidad de esta propuesta.

Metodología

Diseño del constructo

Con el fin de determinar la secuencia del gen de insulina A humana, se utilizó la base de datos UniProt de donde se obtuvo la secuencia de aminoácidos de la proteína (material suplementario Fig S1.). A partir de dicha secuencia se utilizó el banco de datos del National Center of Biotechnology Information, en su plataforma Consensus CDS protein set (CCDS) (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/CCDS/CcdsBrowse.cgi?REQUEST=CCDS&GO=MainBrowse&DATA=CCDS7729.1, accesado en febrero 2020), para obtener la secuencia de nucleótidos para la expresión de insulina (Material suplementario Fig. S2).

A la secuencia de nucleótidos se le realizó una optimización de codones ajustando el marco de lectura humano al de *N.tabacum*, para lo cual se empleó la herramienta Codon Optimization Tool de la empresa IDT (https://www.idtdna.com/CodonOpt, accesado en marzo 2020), de esta manera se obtuvo la secuencia final a utilizar (Material suplementario Fig. S3).

Posteriormente, se evaluaron los posibles péptidos señal para la expresión en tabaco, de manera que permitiesen secretar la insulina a su medio circundante. A partir de esto se escogió la secuencia presente en la peptidasa de secreción extracelular conocida como ARA12 (constructo Ara_ins) reportada previamente en suspensiones celulares de *Arabidopsis thaliana* [36, 37], el péptido señal de la proteína relacionada con la patogénesis de tabaco PR-1a para la secreción al RE (constructo PR1_ins)[38] y, el diseño para el constructo de expresión plastidial (pAF_ins).

Una vez identificadas todas las piezas genéticas, se procedió con su diseño completo bioinformático, utilizando el promotor *Psba* y la región KOZAK, la cual es comúnmente usada como secuencia de iniciación de la transcripción en organismos eucariotas, generando los constructos Ara_ins y PR1_ins, así como el constructo pAF_ins. Este proceso se llevó a cabo con la plataforma Benchling (https://www.benchling.com/) y se sintetizaron por la empresa Twist Biocience.

Transformación de tabaco mediante bombardeo y selección de las plantas transgénicas

Se bombardearon hojas de plantas de *N. tabacum*, suministradas por el Laboratorio de Biotecnología de Plantas (LBP) del CIDASTH (Escuela de Agronomía, ITCR, San Carlos) (Material suplementario Fig. S4A), empleando un sistema de biobalística a baja presión por medio del mecanismo de aceleración PIG ("Particle Inflow Gun"), (fabricado en México y modificado en el Laboratorio BIOTEC de la Escuela de Ciencias y Letras, ITCR San Carlos) (Material suplementario Fig. S4B,) de acuerdo con el protocolo descrito por Daniell, 1997 [39]. Se utilizaron partículas de oro de 0.6 µm de diámetro recubiertas con las muestras del ADN de distintos vectores de transformación nuclear (Ara_ins; PR1_ins) o plastidial (pAF_ins).

Después del bombardeo, las hojas se dejaron en oscuridad durante 48 horas a 25°C. Posteriormente, se seccionaron en fragmentos de tallo y hoja y se colocaron en medio con sales MS [40], con 30g/l de sacarosa 0,1mg/l de Bencialaminopurina, 100 mg/l de tiamina y 1.8 g/l Agar, pH 5.8 (medio RMOP); y suplementado con 500 mg/L de espectinomicina (agente de selección). Las condiciones de cultivo fueron 25°C, intensidad lumínica de 120 µmol/m2/s y un fotoperiodo de 16 horas luz. Se realizaron tres bombardeos de cada constructo en tres momentos distintos.

Procurando homoplasmia, los brotes regenerados a partir de las hojas se sometieron a una segunda ronda de selección. Los brotes regenerados se transfirieron a medio de cultivo con espectinomicina (500mg/L) con el fin de mantener la presión de selección. Las plantas desarrolladas se cultivaron en una cámara de crecimiento (Sanyo MIR-6553, Osaka, Japan) en condiciones de 25 ± 1°C, 250µmol/m2/s, 90% humedad relativa, fotoperiodo de 16 horas luz y 8 horas oscuridad. Una vez confirmada la homoplasmia, las plantas seleccionadas se cultivaron *in vitro* en medio P3 (sales MS, 30g/l de sacarosa y solidificado con 1.8g/l Phytagel, pH 5.8) suplementado con espectinomicina (P3-Spec) para la realización de estudios posteriores.

La integración del gen recombinante se verificó mediante la técnica de PCR, empleando *primers* específicos FW 5- GACCCAGCTGCTGCTTT-3 y REV 5- TGGTACAGCATTGTTCCACA-3 diseñados mediante la herramienta bioinformática PrimerQuest™ Tool (https://www.idtdna.com/pages/tools/primerquest?returnurl=%2FPrimerquest%2FHome%2FIndex) (IDT Integrated DNA Technologies, IO, USA).

Escalamiento de células transformadas de *N. tabacum*

El establecimiento de suspensiones celulares se realizó en el Centro Nacional de Innovaciones Biotecnológicas (CENIBiot), a partir del callo friable de material no transformado, así como en el Laboratorio de Biotecnología de Plantas (LBP) del CIDASTH (Escuela de Agronomía, ITCR, San Carlos) y en el Centro de Investigación en Biotecnología (Escuela de Biología, ITCR, Cartago) para el material transformado.

Se indujo la formación de callos de las plantas transformadas y no transformadas empleando medio MS con 2mg/L de ácido naftalenacético (ANA) y 0.2mg/L de ácido bencilaminopurínico (BAP). Para el mantenimiento de los callos se trabajó con el medio de cultivo semisólido reportado por [41] y el mismo medio, pero sin gelificante, se empleó para el establecimiento de suspensiones celulares.

Para dichas suspensiones se pesaron 3 g de callo friable y se les agregó 50 mL de medio de cultivo. Se incubaron en condiciones de oscuridad y agitación orbital de 100 rpm para su disgregación, a una temperatura aproximada de 25°C. Posteriormente, las suspensiones se tamizaron a 2mm conservando la solución de células.

Extracción de proteínas totales de plantas

Para el análisis de proteínas, con ayuda de nitrógeno líquido se pulverizaron hojas de las plantas de tabaco. A 300mg del material vegetal pulverizado se añadió 1200µL de buffer de extracción (0.01M Na_2HPO_4, 0.05M NaH_2PO_4, 0.5M NaCl y 1%(v/v) Triton X-100) e inhibidores de proteasas (complete Mini, EDTA-free Protease Inhibitor Cocktail, Roche, Basel, Switzerland), se agitó por 30 minutos a 4°C, y se separó mediante centrifugación a 20 000g a 4°C por 10 minutos (Mikro 200 R, Hettich, Tuttlingen, Germany). Se conservaron los precipitados y los sobrenadantes para su posterior análisis mediante un ensayo de inmunoabsorción enzimática (ELISA) en el caso de la insulina y mediante el BCA para las proteínas totales.

Cuantificación de proteínas

Para la evaluación de proteínas totales y de la insulina recombinante se extrajeron las proteínas a partir de los extractos de hojas (sobrenadantes y precipitados), mediante el protocolo descrito en el apartado anterior, y se utilizaron los kits BCA Protein Assay protocol (SC-202389, Santa Cruz Biotechnology, CA, USA) y Human/Canine/Porcine Insulin DuoSet ELISA (DY8056, R&D Systems, MI; USA), siguiendo las recomendaciones del fabricante y utilizando el equipo FLUOstar OPTIMA (BMG LABTECH. Ortenberg, Germany) para la determinación de la absorbancia.

Preparación de extractos vegetales

Se extrajeron proteínas a partir de 2.5g de material vegetal de cada uno de los constructos y de la planta control, a los cuales se adicionó buffer PBS (NaCl 137mM, KCl 2.7mM, Na_2HPO_4 10mM, KH_2PO_4 1.8mM), se centrifugó por 15 min a 4°C a 14 000 rpm y se recuperaron los sobrenadantes para luego concentrarlos mediante el uso de columnas Amicon®Ultra-15 (Ultracel ® -30k, UFC9030, Merck Milipore Ltd, Cork, Irlanda) por 2 horas a 4°C a 4000 rpm (Sorvall Legend X1R, Thermo Fisher Scientific, MA, USA). Los extractos se resuspendieron en medio Eagle modificado de Dulbecco (DMEM, Sigma D6546, UK) e inmediatamente fueron congelados en nitrógeno líquido y almacenados a -80 ˚C hasta su aplicación a las células de carcinoma hepatocelular HepG2.

Cultivo celular

Con el fin de analizar la actividad biológica de la insulina recombinante se cultivó la línea celular hepática HepG2 (HB-8065™ facilitada por el departamento de bioquímica de la Universidad de Costa Rica). Las células fueron cultivadas en medio DMEM (Sigma Aldrich D6546, UK) suplementado con 10% de suero fetal bovino (Sigma Aldrich, F0926, St Louis, USA), 1% penicilamina/estreptomicina (Sigma Aldrich, P4333) y 2% L-glutamina (Sigma Aldrich, G7513), bajo condiciones de 37°C, 5% de CO_2 y 100% humedad.

Estimulación de las células

Para evaluar la fosforilación de los receptores de las células hepáticas inducida por los extractos de plantas de tabaco que expresaban insulina, se sembraron las células HepG2 en placas de 12 pozos en una densidad de $1{\cdot}10^5$ durante 24 horas en el medio antes descrito, y posteriormente se dejaron en inanición por 16 h con medio DMEM sin suplementar, para luego aplicarles los medios condicionados (DMEM:extracto en proporción 1:2) con las proteínas recombinantes (Ara_ins, Pr1_ins, pAF_ins), insulina comercial (Novolin® R, Novo Nordsik, Bagsværd, Dinamarca) como control positivo, y DMEM con extracto de planta silvestre como control negativo. Los tiempos de exposición utilizados fueron 15, 20 y 30 minutos, con condiciones de cultivo de 37°C, humedad de 100% y 5% de CO_2. Posteriormente se descartaron los medios y las placas con células fueron congeladas en nitrógeno líquido y almacenadas a -80°C para su posterior análisis.

Extracción de proteínas y determinación de la fosforilación del receptor

Las células HepG2 se lisaron en frío con buffer RIPA (25 mM Tris•HCl pH 7.6, 150 mM NaCl, 1% NP-40, 1% Deoxicolato de sodio, 0.1% SDS) (Thermo Fisher Scientific, MA, USA) suplementado con inhibidores de fosfatasa (Phosphatase Inhibitor Mini Tablets; Pierce-Thermo Fisher Scientific Inc, IL, USA) e inhibidores de proteasas (complete Mini, EDTA-free Protease Inhibitor Cocktail, Roche, Basel, Switzerland). Las células fueron separadas desde el fondo del pozo y los lisados se homogenizaron por pipeteo para ser recuperados para su análisis.

La actividad biológica de la insulina recombinante se evaluó mediante la determinación de la fosforilación del receptor de la hormona, utilizando el kit Human Phospho-Insulin R ELISA DuoSet IC (DY2718, R&D Systems, MI; USA) de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

Resultados y discusión

Debido a la epidemia cada vez mayor que representa la diabetes a nivel mundial, la comunidad científica ha buscado estrategias para la producción de insulina, lo cual ha sido evidente desde el descubrimiento de la hormona en 1921 por Frederick G. Banting y Charles H, pasando por la década 70-80`s, cuando se produjo la primera insulina recombinante y cada vez más hasta la fecha [42].

Entre los aspectos considerados para la selección de un sistema de expresión se incluyen: características propias de la proteína de interés, las modificaciones postraduccionales requeridas, tamaño del gen a insertar, tamaño del genoma de la célula hospedadora, capacidad de expresión, estabilidad del gen, tasa de crecimiento celular y condiciones necesarias para su mantenimiento [43]. Las bacterias y levaduras son aptas para una rápida (días) o moderada (semanas) expresión, producen altas densidades de biomasa con bajos costos de producción, los medios de cultivo son poco complejos, y ofrecen alta escalabilidad, sin embargo, su

capacidad para realizar modificaciones postraduccionales complejas como las glicosilaciones es limitada, a diferencia de las células vegetales y animales que sí realizan estas modificaciones a pesar de que ofrecen mayor complejidad para establecer procesos de escalamiento [26, 44].

Las modificaciones postraduccionales y el correcto plegamiento son indispensables para la solubilidad y bioactividad de las proteínas eucariotas recombinantes [45, 46]. Por consiguiente, la producción de proteínas recombinantes contribuye a la mejora de las condiciones de salud con el desarrollo de vacunas, anticuerpos y fármacos funcionales, personalizados, puros, seguros y de calidad para el tratamiento de enfermedades crónicas, tumores, cáncer, infecciones bacterianas o virales, entre otras [47].

En el caso de la insulina obtenida en *E. coli* se produce en cuerpos de inclusión donde se encuentra mal plegada, por lo que, las células deben ser recuperadas para extraer los cuerpos de inclusión, lavarlos y solubilizar las moléculas precursoras de la proteína. Posteriormente, mediante reacciones enzimáticas se debe plegar la molécula y formar los enlaces disulfuro [3, 48]. Para obtener un producto puro y seguro para el uso humano, en este proceso se deben eliminar remanentes de la célula hospedadora, subproductos generados, ácidos nucleicos y reactivos usados en el proceso de *downstream,* por lo que resulta altamente costoso [3, 24].

Además del tabaco, otras plantas que han sido usadas para la producción heteróloga de insulina incluyen el arroz (*Oryza sativa* L.) y maní (*Arachis hypogaea* L.), con resultados prometedores para ser consideradas como sistema de administración oral de la hormona [49, 50]. Debido a estos y otros antecedentes [51, 52, 53], nuestro grupo planteó la alternativa de la expresión de la insulina en cloroplastos o a nivel nuclear, empleando dos péptidos señal distintos derivados de *A. thalina* y de *N. tabacum* para la secreción de la hormona, y realizó además pruebas preliminares para evaluar su factibilidad.

Transformación de tabaco mediante bombardeo y selección de las plantas transgénicas

Al evaluar el material transformado a los 15 días de crecimiento se observaron las diferencias de crecimiento en medio RMOP con espectinomicina, entre los transformantes y los no transformantes, evidenciando los casos de transformación exitosa (Material Suplementario Fig. S 5).

Verificación de la integración del gen de insulina y selección de las plantas transgénicas

En la figura 1A se muestra la integración exitosa de las secuencias de interés en el genoma vegetal, tanto plastidial como nuclear. Se obtuvieron productos de PCR de tamaño esperado según los imprimadores diseñados, para un fragmento de 245pb. Además, dichos resultados muestran que el material vegetal modificado genéticamente cultivado *in vitro* fue capaz de expresar la insulina recombinante.

Determinación de la insulina recombinante

Con el fin de comprobar la expresión de la insulina se analizaron los sobrenadantes y precipitados de los extractos proteicos de las líneas transformantes mediante la técnica de ELISA. En la figura 1B se muestra que la proteína recombinante se recuperó mayoritariamente a partir de los sobrenadantes. A pesar de no observarse diferencias estadísticamente significativas entre los transformantes Ara_ins y pAF_ins, es posible afirmar que el promedio de secreción de este último es aproximadamente 1.2 veces superior al de Ara_ins. Por otro lado, el transformante Pr1_ins presentó los menores rendimientos tanto para sobrenadantes (secreción) como para los precipitados.

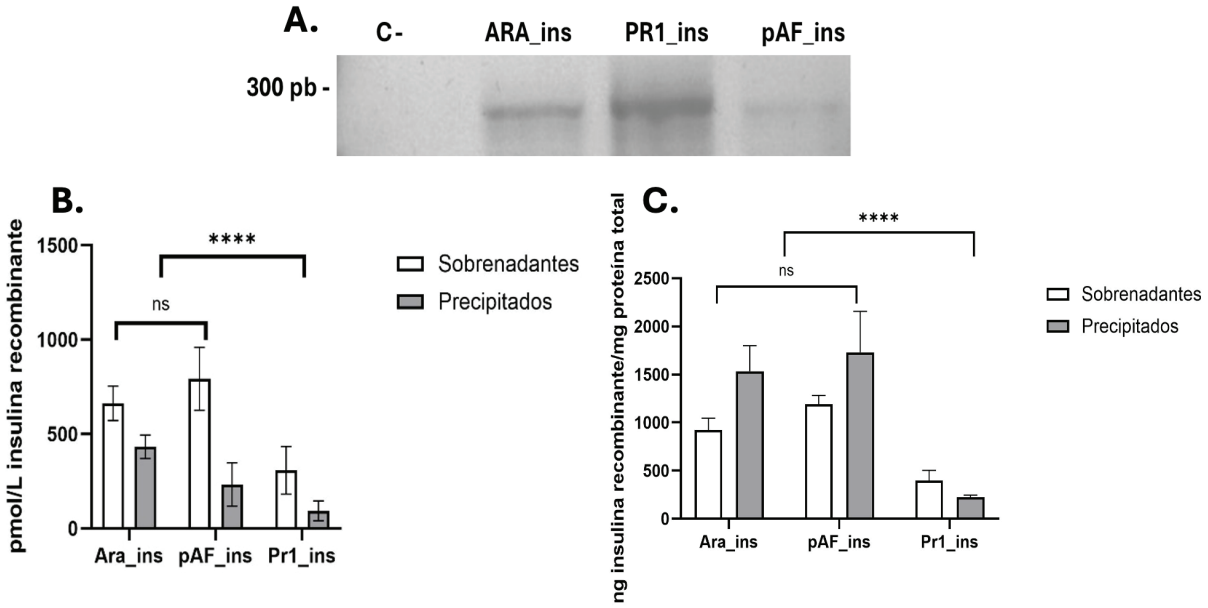


Figura 1. Expresión de la insulina recombinante en plantas de *N. tabacum*. A. Integración del transgén de la insulina al genoma de las plantas de tabaco. Tamaño esperado del codón que expresa la insulina humana para cada uno de los constructos en *N. tabacum*, una planta no transformada fue usada como control negativo. B. Evaluación de insulina recombinante en sobrenadantes y precipitados mediante ELISA. C. Comparación de la insulina producida con respecto a la proteína total recuperada de plantas de *N. tabacum*. Evaluación de insulina recombinante en sobrenadantes y precipitados mediante ELISA. Los rendimientos de secreción se calcularon a partir de las concentraciones de proteínas obtenidas por ELISA (precipitados: gris; sobrenadante: blanco) y demostró ser significativamente mayor para los clones derivados de Ara_ins y pAF_ins en comparación con el clon Pr1_ins, que mostró el peor rendimiento. *p ≤0.05 **p≤0.005, ***p≤0.001, ****p≤0.0001

Para una mejor comprensión del comportamiento de los transformantes, se analizó comparativamente cuánto de la proteína total corresponde a insulina. En la figura 1C se muestra que la mejor expresión se obtuvo con los clones Ara_ins y pAF_ins, siendo que la relación de ng de insulina por cada mg de proteína total es alta tanto en sobrenadantes como en precipitados, mientras que para el transformante derivado de Pr1_ins, la relación es proporcional, puesto que, su producción de proteína total es baja. A pesar de ello, se recupera más proteína recombinante en los sobrenadantes que en los precipitados.

Según lo esperado, al ser el constructo pAF_ins (figura 1B) dirigido a la transformación plastidial, ocurre la acumulación de altos niveles de proteínas recombinantes, con bajas posibilidades de silenciamiento de la expresión genética. La capacidad de síntesis de enzimas involucradas en vías metabólicas completas por estas organelas ha sido un atractivo para su uso desde hace varias décadas [33, 54, 55].

El vector utilizado para la transformación plastidial fue el pAF, que ha sido usado con éxito en la expresión del gen EDA y del gen L1 del virus del papiloma humano [56, 57]. En el sitio de clonación múltiple de este vector se insertó la secuencia de la insulina, que se expresó bajo el control transcripcional del promotor constitutivo plastidial del gen *psbA* de tabaco, fusionado a su 5'UTR y la región KOZAC del terminador del gen *psb*A. La integración de los genes se hizo por recombinación homóloga entre los genes *trn*I y *trn*A. Al estar la zona de inserción en la región invertida repetida, cada plastoma contiene dos copias de los genes de interés como resultado del proceso de corrección de copia de los plastidios, lo cual tiene un impacto directo en la cantidad de proteína recombinante derivada de este vector [58].

Por su parte, los vectores utilizados para la transformación nuclear fueron Ara_ins y PR1_ins (ambos con péptido señal) [36, 38], también bajo el control transcripcional del gen *psbA* de tabaco fusionado a su 5'UTR y la región KOZAC y del terminador del gen *pbsA*, sin embargo, las plantas transformadas derivadas de estos constructos tuvieron comportamientos distintos en cuanto a expresión de la hormona y a su actividad biológica.

Para el constructo Ara_ins se esperaba una secreción similar a la presentada por el constructo plastidial, como se observa en la figura 2A, ambos diseños genéticos están enfocados a la expresión génica y su secreción fuera de la célula, lo cual, para efectos de escalamiento y producción farmacológica, resulta de gran utilidad al facilitar la recuperación de la proteína de interés con respecto a la acumulación en otros compartimentos celulares [59].

De esta manera, Ara_ins y pAF_ins presentan mejores resultados que Pr1_ins, siendo los valores de pAF_ins 1.3 veces superiores a los de Ara_ins en lo que respecta a los sobrenadantes. Por su parte, en lo referente a los precipitados, la mayoría de la proteína presente corresponde a insulina que no logró secretarse, salvo para Pr1_ins en cuyo caso la concentración en el sobrenadante es superior a la del precipitado.

El uso de la proteína relacionada a la patogénesis del tabaco (PR1) presentó los menores rendimientos, tanto para sobrenadantes como para precipitados, lo cual podría deberse a una disminución de su actividad, como se ha reportado en estudios anteriores que buscaban la secreción de moléculas al RE [60, 61]. Asimismo, el RE, tiene sus propios mecanismos de control que degrada proteínas mal ensambladas o reconocidas como extrañas, lo cual pudo haber sucedido con la insulina recombinante producida por las plantas derivadas de este constructo [55].

En la investigación de Boyhan y Daniell (2011) [52], reportaron como satisfactorios porcentajes entre 40 y 50% de proteína recombinante en las hojas maduras de tabaco a partir de transformaciones genéticas en los plastomas . Como se observa en la figura 2B, alrededor de 40% de la proteína total de los clones derivados de Ara_ins y pAF_ins corresponde a insulina recombinante en los sobrenadantes y para el caso de la Pr1_ins, esta proporción alcanza el 60%, lo cual indica que este constructo, a pesar de producir poca proteína total, expresa mayor proporción de la proteína de interés.

Escalamiento de células transformadas de *N. tabacum*

El cultivo del material regenerado en medio RMOP con espectinomicina permitió identificar los transformantes, y se requirió realizar rondas de selección adicionales en medio P3-Spec para alcanzar la homoplasmia. Siendo que los brotes se regeneran a partir de una o pocas células, la regeneración de la planta es un tejido quimérico, por lo tanto, se debe mantener la presión de selección para garantizar obtener el 100% de los cloroplastos transformados [62].

Como paso previo al establecimiento de suspensiones celulares, se desarrolló el protocolo de callogénesis, con resultados comparables a los reportados por Campos-Delgado (2015) [41]. Si bien el crecimiento celular mostró un patrón normal, a partir del día 15 de cultivo se tuvo contaminación fúngica y bacteriana que resultó recurrente, lo cual limitó el crecimiento y provocó toxicidad y muerte celular (Material Suplementario Fig. S6). Varios autores han reportado la posibilidad de contaminación latente que se activa al modificarse las condiciones de cultivo [63], como en este caso al cambiar de callo a suspensión celular. La contaminación endógena repercute negativamente en el establecimiento de cultivos a mayor escala, por lo que se desechó el material en este punto.

Si bien el uso de las plantas como biofactorías para la producción de proteínas recombinantes ha sido reconocida por su bioseguridad, pues presentan un bajo riesgo de contaminación del producto por virus de mamíferos, patógenos transmitidos por la sangre, oncogenes y toxinas bacterianas; los problemas derivados de la contaminación endógena suelen ser un desafío para el establecimiento de suspensiones celulares que permitan una optimización de dicha producción [64, 65].

Aunado a ello, se ha documentado que algunas plantas como *N. tabacum* pueden producir compuestos tóxicos como el alcaloide de nicotina, lo cual implica que se requiere que el producto biofarmacéutico sea sometido a procedimientos de purificación para la eliminación del alcaloide y garantizar la calidad del fármaco. Se ha reportado la eliminación del alcaloide con el uso de la tecnología CRISPR/Cas9, la cual permitió niveles de nicotina de hasta un 99,6% más bajos [65].

Por lo tanto, los resultados obtenidos en este periodo indican la factibilidad de la estrategia planteada para la producción de insulina humana recombinante incluyendo un péptido señal en este modelo vegetal.

Actividad biológica de la insulina recombinante

El receptor de la insulina pertenece a la familia de tirosina quinasas. La insulina se une con alta afinidad y un alto grado de especificidad, lo que lleva a la autofosforilación del RI en residuos de tirosina para reclutar y fosforilar proteínas sustrato del receptor de insulina (IRS) como PI3K, requeridas para continuar la cascada de transducción [66, 67], modificando el metabolismo intracelular y la expresión génica [68]. De manera preliminar, mediante análisis semicuantitativo de ELISA, se evaluó la funcionalidad biológica de la insulina recombinante secretada por cada cepa para identificar la capacidad de la hormona para unirse e inducir la fosforilación de su receptor en las células hepáticas. Los sobrenadantes de cada transformante fueron concentrados y normalizados a igual cantidad de proteína y se utilizaron para estimular las células hepáticas HepG2, según se observa en las figuras 2A y 2B.

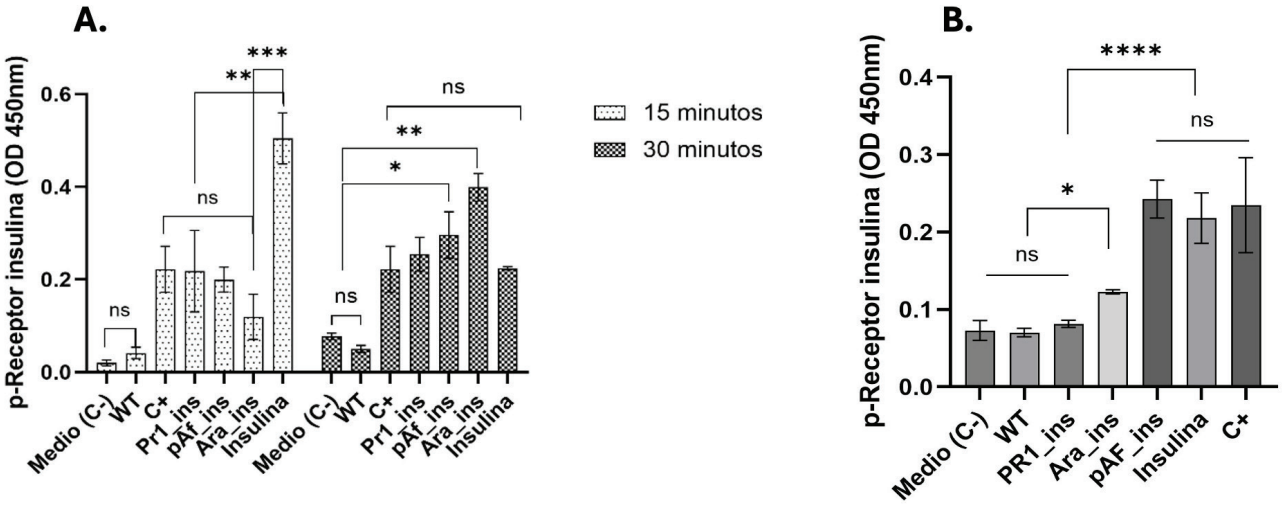


Figura 2. Actividad biológica de la insulina recombinante producida por N. tabacum. La actividad biológica de la proteína recombinante se evaluó para cada cepa transgénica con base en la detección y cuantificación de la fosforilación del receptor de insulina en las células HepG2. A. La exposición para inducir la activación de los receptores se realizó por 15 y 30 minutos. B. La exposición para inducir la activación de los receptores se realizó por 20 minutos. Se realizó un análisis estadístico con respecto al control negativo (medio de inanición) y para determinar las diferencias entre las cepas generadas. Se utilizó una insulina recombinante disponible comercialmente como control positivo (c+, 50 ng/ml). *p≤0,05, **p≤0,005,***p≤0,001, ****p≤0.0001.

Se encontró que, con 15 minutos de exposición, la insulina comercial tiene mayor acción sobre los receptores que las generadas por los transformantes derivados de *N. tabacum*, sin diferencias estadísticamente significativas entre ellos y el control positivo interno de la prueba. Por otra parte, con exposición de 30 minutos, la fosforilación de los receptores inducida por la insulina comercial disminuye, mientras que aumenta la actividad biológica de la insulina secretada por los transformantes de *N. tabacum.* Se realizó nuevamente el ensayo por 20 minutos, obteniendo que el extracto del transformante plastidial pAF_insulina presenta una actividad biológica similar a la insulina comercial, aproximadamente 1.8 veces superior al constructo Ara_ins y casi 2.5 veces superior al PR1_ins, el cual se comportó de manera similar a los controles positivos del ensayo.

El dominio de unión de la molécula de insulina se compone de porciones distantes de las cadenas A y B, que se unen en una superficie como resultado del plegamiento tridimensional para formar la región de unión al receptor [68]. Como se observa en la figura 2, en todos los casos e independientemente del tiempo de exposición, la insulina recombinante derivada de los clones transformantes fue capaz de inducir la fosforilación del receptor, lo cual indica que los procesos de transcripción, traducción y modificaciones postraduccionales ocurridos sobre la proteína son apropiados. No obstante, esto debería verificarse posteriormente mediante otras técnicas analíticas.

Es importante mencionar que el receptor de la insulina es una molécula compuesta por dos subunidades α extracelulares y dos subunidades β transmembrana unidas por enlaces disulfuro [69] Cuando la insulina se une al receptor realiza un cambio conformacional y la autofosforilación en la región Y972 de la subunidad β para el reclutamiento de las proteínas sustrato y activación de cascadas como la PI3K-AKT para la captación de glucosa [70,71].

Esta autofosforilación del receptor permite que las proteínas efectoras se acoplen en sitios específicos para desencadenar la señalización de la insulina [72, 73]. Esto genera modificaciones en el metabolismo como la inhibición de la producción de glucosa en el hígado, captación de glucosa y síntesis de glucógeno en el músculo y en el tejido adiposo inhibe la lipólisis [74].

En estudios anteriores se ha descrito que, entre más de 200 análogos de insulina analizados, existe una alta correlación entre la afinidad de unión al receptor y el efecto biológico [68], por lo que en este caso también se podría esperar que la insulina producida por nuestro grupo sea capaz de desencadenar la respuesta fisiológica normal al ser suministrada *in vivo* a sujetos humanos.

Conclusiones

Como ha sido caracterizado anteriormente, las plantas de tabaco presentan múltiples ventajas para ser utilizadas como plataforma de expresión de proteínas humanas recombinantes, incluyendo el bajo costo de producción, alta tasa de generación de biomasa, su capacidad de generar modificaciones postraduccionales complejas, ser libres de endotoxinas, la posibilidad de escalabilidad, y la seguridad de que pueden ser cultivadas en ambientes controlados, lo que minimiza el riesgo de contaminación con patógenos humanos.

Los resultados de esta investigación señalan que, para la producción de insulina recombinante en plantas de tabaco, es más recomendable el uso de un constructo de transformación plastidial que uno de transformación nuclear, pues su rendimiento es relativamente superior. Adicionalmente, con esta prueba de concepto se generó información preliminar del beneficio de incluir un péptido señal, de que la estrategia es escalable, y de que esto no afecta la actividad biológica de la hormona, ya que induce la autofosforilación de su receptor de manera similar a como lo hace la insulina comercial.

Agradecimientos

Los autores agradecen al *M.Sc*. Cristopher Orozco por su colaboración en la implementación de suspensiones celulares, y a los estudiantes asistentes involucrados en el proyecto, pues gracias a su valioso aporte se logró desarrollar este trabajo. Los investigadores agradecen además a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del ITCR, que apoyó económicamente el desarrollo de este trabajo mediante el CF 1510129. Igualmente, se agradece y recuerda al ingeniero y amigo David García Gómez (D.E.P.).

Referencias

[1] J. B. Cole and J. C. Florez, "Genetics of diabetes mellitus and diabetes complications," (in eng), *Nat Rev Nephrol,* vol. 16, no. 7, pp. 377-390, Jul 2020. https://doi.org/10.1038/s41581-020-0278-5

[2] D. N. Koye, D. J. Magliano, R. G. Nelson, and M. E. Pavkov, "The Global Epidemiology of Diabetes and Kidney Disease," (in eng), Adv Chronic Kidney Dis, vol. 25, no. 2, pp. 121-132, Mar 2018. doi:10.1053/j.ackd.2017.10.011

[3] Y. Y. Siew and W. Zhang, "Downstream processing of recombinant human insulin and its analogues production from E. coli inclusion bodies," (in eng), Bioresour Bioprocess, vol. 8, no. 1, p. 65, 2021, doi: 10.1186/s40643-021-00419-w.

[4] International Diabetes Federation, "IDF Diabetes Atlas," 10th ed, (in eng), Brussels, Belgium, Dec 2021, https://diabetesatlas.org/data/en/

[5] World Health Organization, "The WHO Global Diabetes Compact," (in eng), Geneva, 2023, https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/diabetes

[6] Ministerio de Salud de Costa Rica, "Alrededor de 20 personas han sido diagnnosticadas diariamente con diabetes mellitus en 2023," (in spa), San José, Costa Rica, 2023, https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/prensa/60-noticias-2023/1710-alrededor-de-20-personas-han-sido-diagnosticadas-diariamente-con-diabetes-mellitus-en-el-2023#:~:text=Martes%2014%20de%20noviembre%2C%202023,con%20esta%20enfermedad%20por%20d%C3%ADa..

[7] A. Chawla, R. Chawla, and S. Jaggi, "Microvasular and macrovascular complications in diabetes mellitus: Distinct or continuum?," (in eng), *Indian J Endocrinol Metab,* vol. 20, no. 4, pp. 546-51, Jul-Aug 2016, doi: 10.4103/2230-8210.183480.

[8] A. A. Lam, A. Lepe, S. H. Wild, and C. Jackson, "Diabetes comorbidities in low- and middle-income countries: An umbrella review," (in eng), *J Glob Health,* vol. 11, p. 04040, 2021, doi: 10.7189/jogh.11.04040.

[9] A. M. Y. Zhang, E. A. Wellberg, J. L. Kopp, and J. D. Johnson, "Hyperinsulinemia in Obesity, Inflammation, and Cancer," (in eng), *Diabetes Metab J,* vol. 45, no. 3, pp. 285-311, May 2021, doi: 10.4093/dmj.2020.0250.

[10] D. Tomic, J. E. Shaw, and D. J. Magliano, "The burden and risks of emerging complications of diabetes mellitus," (in eng), *Nat Rev Endocrinol,* vol. 18, no. 9, pp. 525-539, Sep 2022, doi: 10.1038/s41574-022-00690-7.

[11] N. A. ElSayed *et al.*, "4. Comprehensive Medical Evaluation and Assessment of Comorbidities: Standards of Care in Diabetes-2023," (in eng), *Diabetes Care,* vol. 46, no. Suppl 1, pp. S49-s67, Jan 1 2023, doi: 10.2337/dc23-S004.

[12] G. Akkus and M. Sert, "Diabetic foot ulcers: A devastating complication of diabetes mellitus continues non-stop in spite of new medical treatment modalities," (in eng), *World J Diabetes,* vol. 13, no. 12, pp. 1106-1121, Dec 15 2022, doi: 10.4239/wjd.v13.i12.1106.

[13] G. Wilcox, "Insulin and insulin resistance," (in eng), *Clin Biochem Rev,* vol. 26, no. 2, pp. 19-39, May 2005.

[14] A. Arunagiri *et al.*, "Proinsulin misfolding is an early event in the progression to type 2 diabetes," (in eng), *Elife,* vol. 8, Jun 11 2019, doi: 10.7554/eLife.44532.

[15] S. Y. Park, J. F. Gautier, and S. Chon, "Assessment of Insulin Secretion and Insulin Resistance in Human," (in eng), *Diabetes Metab J,* vol. 45, no. 5, pp. 641-654, Sep 2021, doi: 10.4093/dmj.2021.0220.

[16] D. F. Steiner, S. Y. Park, J. Støy, L. H. Philipson, and G. I. Bell, "A brief perspective on insulin production," (in eng), *Diabetes Obes Metab,* vol. 11 Suppl 4, pp. 189-96, Nov 2009, doi: 10.1111/j.1463-1326.2009.01106.x.

[17] B. E. Corkey, J. T. Deeney, and M. J. Merrins, "What Regulates Basal Insulin Secretion and Causes Hyperinsulinemia?," (in eng), *Diabetes,* vol. 70, no. 10, pp. 2174-2182, Oct 2021, doi: 10.2337/dbi21-0009.

[18] Fortune Business Insights, "Human Insulin Market Size, Share & Industry Analysis, By Type (Analogue Insulin and Traditional Human Insulin), By Diabetes Type (Diabetes 1 and Diabetes 2), By Distribution Channel (Hospital Pharmacy and Retail & Online Pharmacy), and Regional Forecast, 2024-2032," (in eng), Pune, India, Sep 8 2025, https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/human-insulin-market-100395

[19] N. A. Baeshen *et al.*, "Cell factories for insulin production," (in eng), *Microb Cell Fact,* vol. 13, p. 141, Oct 2 2014, doi: 10.1186/s12934-014-0141-0.

[20] A. D. Wright, C. H. Walsh, M. G. Fitzgerald, and J. M. Malins, "Very pure porcine insulin in clinical practice," (in eng), *Br Med J,* vol. 1, no. 6155, pp. 25-7, Jan 6 1979, doi: 10.1136/bmj.1.6155.25.

[21] J. Alyas, "Human Insulin: History, Recent Advances, and Expression Systems for Mass Production.," vol. 8, A. Rafiq, Amir, H., Khan, S., Sultana, T., Ali, A., Hameed, A., Ahmad, I., Kazmi, A., Sajid, T., & Ahmad, A., Ed., ed: Biomedical Research and Therapy, 2021, pp. 4540-4561. doi: 10.15419/bmrat.v8i9.692

[22] P. Hazra *et al.*, "A novel peptide design aids in the expression and its simplified process of manufacturing of Insulin Glargine in Pichia pastoris," (in eng), *Appl Microbiol Biotechnol,* vol. 105, no. 8, pp. 3061-3074, Apr 2021, doi: 10.1007/s00253-021-11224-y.

[23] J. Szewczak, A. Bierczyńska-Krzysik, M. Piejko, P. Mak, and D. Stadnik, "Isolation and Characterization of Acetylated Derivative of Recombinant Insulin Lispro Produced in Escherichia coli," (in eng), *Pharm Res,* vol. 32, no. 7, pp. 2450-7, Jul 2015, doi: 10.1007/s11095-015-1637-y.

[24] H. G. Hwang *et al.*, "Recombinant Glargine Insulin Production Process Using Escherichia coli," (in eng), *J Microbiol Biotechnol,* vol. 26, no. 10, pp. 1781-1789, Oct 28 2016, doi: 10.4014/jmb.1602.02053.

[25] A. D. Riggs, "Making, Cloning, and the Expression of Human Insulin Genes in Bacteria: The Path to Humulin," (in eng), *Endocr Rev,* vol. 42, no. 3, pp. 374-380, May 25 2021, doi: 10.1210/endrev/bnaa029.

[26] A. Beygmoradi, A. Homaei, R. Hemmati, and P. Fernandes, "Recombinant protein expression: Challenges in production and folding related matters," (in eng), *Int J Biol Macromol,* vol. 233, p. 123407, Apr 1 2023, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123407.

[27] M. R. Davey, P. Anthony, J. B. Power, and K. C. Lowe, "Plant protoplasts: status and biotechnological perspectives," (in eng), *Biotechnol Adv,* vol. 23, no. 2, pp. 131-71, Mar 2005, doi: 10.1016/j.biotechadv.2004.09.008.

[28] A. Berbec and T. Doroszewska, "The Use of Nicotiana Species in Tobacco Improvement.," *SpringerInternational Publishing,* En N. V.Ivanov, N. Sierro, & M. C. Peitsch (Eds.), *The Genome*, pp. pp. 101-146, 2020, doi: 7/978-3-030-29493-9_8.

[29] N. Selwal *et al.*, and phytoremediation capabilities of the tobacco plant: Advancements through genetic engineering and cultivation techniques," *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology,* vol. 52, 2023, doi: 10.1016/j.bcab.2023.102845.

[30] R. Tremblay, D. Wang, A. M. Jevnikar, and S. Ma, "Tobacco, a highly efficient green bioreactor for production of therapeutic proteins," (in eng), *Biotechnol Adv,* vol. 28, no. 2, pp. 214-21, Mar-Apr 2010, doi: 10.1016/j.biotechadv.2009.11.008.

[31] A. L. Demain and P. Vaishnav, "Production of recombinant proteins by microbes and higher organisms," (in eng), *Biotechnol Adv,* vol. 27, no. 3, pp. 297-306, May-Jun 2009, doi: 10.1016/j.biotechadv.2009.01.008.

[32] S. M. Rozov, A. A. Zagorskaya, Y. M. Konstantinov, and E. V. Deineko, "Three Parts of the Plant Genome: On the Way to Success in the Production of Recombinant Proteins," (in eng), *Plants (Basel),* vol. 12, no. 1, Dec 21 2022, doi: 10.3390/plants12010038.

[33] R. Bock, "Engineering Chloroplasts for High-Level Constitutive or Inducible Transgene Expression," (in eng), *Methods Mol Biol,* vol. 2317, pp. 77-94, 2021, doi: 10.1007/978-1-0716-1472-3_3.

[34] M. Naeem, R. Han, N. Ahmad, W. Zhao, and L. Zhao, "Tobacco as green bioreactor for therapeutic protein production: latest breakthroughs and optimization strategies." Plant Growth Regulation, 103(2), 227-241. doi: 10.1007/s10725-023-01106-w

[35] S. Bhoria, J. Yadav, H. Yadav, D. Chaudhary, R. Jaiwal, and P. K. Jaiwal, "Current advances and future prospects in production of recombinant insulin and other proteins to treat diabetes mellitus," (in eng), *Biotechnol Lett,* vol. 44, no. 5-6, pp. 643-669, Jun 2022, doi: 10.1007/s10529-022-03247-w.

[36] J. M. Hamilton, D. J. Simpson, S. C. Hyman, B. K. Ndimba, and A. R. Slabas, "Ara12 subtilisin-like protease from Arabidopsis thaliana: purification, substrate specificity and tissue localization," (in eng), *Biochem J,* vol. 370, no. Pt 1, pp. 57-67, Feb 15 2003, doi: 10.1042/bj20021125.

[37] C. Navarre, B. De Muynck, G. Alves, D. Vertommen, B. Magy, and M. Boutry, "Identification, gene cloning and expression of serine proteases in the extracellular medium of Nicotiana tabacum cells," (in eng), *Plant Cell Rep,* vol. 31, no. 10, pp. 1959-68, Oct 2012, doi: 10.1007/s00299-012-1308-y.

[38] D. C. Dixon, J. R. Cutt, and D. F. Klessig, "Differential targeting of the tobacco PR-1 pathogenesis-related proteins to the extracellular space and vacuoles of crystal idioblasts," (in eng), *Embo j,* vol. 10, no. 6, pp. 1317-24, Jun 1991, doi: 10.1002/j.1460-2075.1991.tb07650.x.

[39] H. Daniell, "Transformation and foreign gene expression in plants by microprojectile bombardment," (in eng), *Methods Mol Biol,* vol. 62, pp. 463-89, 1997, doi: 10.1385/0-89603-480-1:463.

[40] T. Murashige, "A revised medium for rapid growthand bio-assays with tobacco tissue cultures," vol. 15, F. Skoog, Ed., ed: Physiol. Plant, 1962, pp. 473–497.

[41] S. Campos-Delgado, "Establecimiento de cultivos celulares de Nicotiana tabacum L. Proyecto estudiantil Instituto Tecnológico de Costa Rica.," (in spa), Repositorio TEC, 2015, https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6417

[42] A. Sahoo, P. K. Das, V. V. Dasu, and S. Patra, "Insulin evolution: A holistic view of recombinant production advancements," *International Journal of Biological Macromolecules,* vol. 277, p. 133951, 2024/10/01/ 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.133951.

[43] M. J. B. Burnett and A. C. Burnett, " Therapeutic recombinant protein production in plants: Challenges and opportunities.# PLANTS, PEOPLE, PLANET, 2(2), 121-132. doi: 10.1002/ppp3.10073

[44] W. H. Brondyk, "Selecting an appropriate method for expressing a recombinant protein," (in eng), *Methods Enzymol,* vol. 463, pp. 131-47, 2009, doi: 10.1016/s0076-6879(09)63011-1.

[45] C. H. Schein, "Production of Soluble Recombinant Proteins in Bacteria."Bio/Technology, 7(11), 1141-1149. https://doi.org/10.1038/nbt1189-1141

[46] S. Schillberg, N. Raven, H. Spiegel, S. Rasche, and M. Buntru, "Critical Analysis of the Commercial Potential of Plants for the Production of Recombinant Proteins," (in eng), *Front Plant Sci,* vol. 10, p. 720, 2019, doi: 10.3389/fpls.2019.00720.

[47] A. Jayakrishnan et al., "Evolving Paradigms of Recombinant Protein Production in Pharmaceutical Industry: A Rigorous Review." Sci, 6(1), Article 1. doi: 10.3390/sci6010009

[48] M. Zieliński *et al.*, "Expression and purification of recombinant human insulin from E. coli 20 strain," (in eng), *Protein Expr Purif,* vol. 157, pp. 63-69, May 2019, doi: 10.1016/j.pep.2019.02.002.

[49] Y.-S. Chen, J. L. Zaro, D. Zhang, N. Huang, A. Simon, and W.-C. Shen, "Characterization and Oral Delivery of Proinsulin-Transferrin Fusion Protein Expressed Using ExpressTec," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 19, no. 2*,* doi: 10.3390/ijms19020378.

[50] Z. Ling *et al.*, "Transgenic Expression and Identification of Recombinant Human Proinsulin in Peanut," *Braz. arch. biol. technol.,* vol. 59, 2016, doi: 10.1590/1678-4324-2016150131.

[51] P. Maliga, T. Tungsuchat-Huang, and K. A. Lutz, "Transformation of the Plastid Genome in Tobacco: The Model System for Chloroplast Genome Engineering," (in eng), *Methods Mol Biol,* vol. 2317, pp. 135-153, 2021, doi: 10.1007/978-1-0716-1472-3_6.

[52] D. Boyhan and H. Daniell, "Low-cost production of proinsulin in tobacco and lettuce chloroplasts for injectable or oral delivery of functional insulin and C-peptide," (in eng), *Plant Biotechnol J,* vol. 9, no. 5, pp. 585-98, Jun 2011. doi: 10.1111/j.1467-7652.2010.00582.x

[53] N. Rajkumari, S. Alex, K. B. Soni, K. N. Anith, M. M. Viji, and A. G. Kiran, "Silver nanoparticles for biolistic transformation in Nicotiana tabacum L," (in eng), *3 Biotech,* vol. 11, no. 12, p. 497, Dec 2021.

[54] S. A. Olejniczak, E. Łojewska, T. Kowalczyk, and T. Sakowicz, "Chloroplasts: state of research and practical applications of plastome sequencing," (in eng), *Planta,* vol. 244, no. 3, pp. 517-27, Sep 2016, doi: 10.1007/s00425-016-2551-1.

[55] Z. Duan *et al.*, "Mechanisms of Endoplasmic Reticulum Protein Homeostasis in Plants," (in eng), *Int J Mol Sci,* vol. 24, no. 24, Dec 18 2023, doi: 10.3390/ijms242417599.

[56] A. Fernández-San Millán *et al.*, "Human papillomavirus L1 protein expressed in tobacco chloroplasts self-assembles into virus-like particles that are highly immunogenic," in *Plant Biotechnol J*, vol. 6, no. 5). England, 2008, pp. 427-41. https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2008.00338.x

[57] I. Farran, I. McCarthy-Suárez, F. Río-Manterola, C. Mansilla, J. J. Lasarte, and A. M. Mingo-Castel, "The vaccine adjuvant extra domain A from fibronectin retains its proinflammatory properties when expressed in tobacco chloroplasts," (in eng), *Planta,* vol. 231, no. 4, pp. 977-90, Mar 2010, doi: 10.1007/s00425-010-1102-4.

[58] P. Maliga, "Plastid transformation in higher plants," (in eng), *Annu Rev Plant Biol,* vol. 55, pp. 289-313, 2004, doi: 10.1146/annurev.arplant.55.031903.141633.

[59] S. Schillberg, N. Raven, R. Fischer, R. M. Twyman, and A. Schiermeyer, "Molecular farming of pharmaceutical proteins using plant suspension cell and tissue cultures," (in eng), *Curr Pharm Des,* vol. 19, no. 31, pp. 5531-42, 2013, doi: 10.2174/1381612811319310008.

[60] J. Denecke, J. Botterman, and R. Deblaere, "Protein secretion in plant cells can occur via a default pathway," (in eng), *Plant Cell,* vol. 2, no. 1, pp. 51-9, Jan 1990, doi: 10.1105/tpc.2.1.51.

[61] A. Gnanasambandam and R. G. Birch, "Efficient developmental mis-targeting by the sporamin NTPP vacuolar signal to plastids in young leaves of sugarcane and Arabidopsis," (in eng), *Plant Cell Rep,* vol. 23, no. 7, pp. 435-47, Dec 2004, doi: 10.1007/s00299-004-0860-5.

[62] Z. Svab and P. Maliga, "High-frequency plastid transformation in tobacco by selection for a chimeric aadA gene," (in eng), *Proc Natl Acad Sci U S A,* vol. 90, no. 3, pp. 913-7, Feb 1 1993, doi: 10.1073/pnas.90.3.913.

[63] N. V. Romadanova, A. B. Tolegen, S. V. Kushnarenko, E. V. Zholdybayeva, and J. C. Bettoni, "Effect of Plant Preservative Mixture(TM) on Endophytic Bacteria Eradication from In Vitro-Grown Apple Shoots," (in eng), *Plants (Basel),* vol. 11, no. 19, Oct 5 2022.

[64] P. Doran, "Foreign protein production in plant tissue cultures"(in eng), Current Opinion in Biotechnology, vol. 11, no. 2, pp. 199-204, Apr 11 2000, doi.org/10.1016/S0958-1669(00)00086-0.

[65] J. K. Bharathi, P. Suresh, M. A. Samy Prakash, S. Muneer, "Exploring recent progress of molecular farming for therapeutic and recombinant molecules in plant systems" (in eng), Heliyon, vol. 10, no. 18, pp. 199-204, Sep 2024, doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37634.

[66] J. Pei, B. Wang, and D. Wang, "Current Studies on Molecular Mechanisms of Insulin Resistance," (in eng), *J Diabetes Res,* vol. 2022, p. 1863429, 2022, doi: 10.1155/2022/1863429.

[67] X. Zhao, X. An, C. Yang, W. Sun, H. Ji, and F. Lian, "The crucial role and mechanism of insulin resistance in metabolic disease," (in eng), *Front Endocrinol (Lausanne),* vol. 14, p. 1149239, 2023, doi: 10.3389/fendo.2023.1149239.

[68] C. R. Kahn and M. F. White, "The insulin receptor and the molecular mechanism of insulin action," (in eng), *J Clin Invest,* vol. 82, no. 4, pp. 1151-6, Oct 1988. doi: 10.1172/JCI113711.

[69] Le, T. K. C., Dao, X. D., Nguyen, D. V., Luu, D. H., Bui, T. M. H., Le, T. H., Nguyen, H. T., Le, T. N., Hosaka, T., & Nguyen, T. T. T. (2023). Insulin signaling and its application. Frontiers in Endocrinology, 14. https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1226655

[70] Peng, J., & He, L. (2018). IRS Posttranslational Modifications in Regulating Insulin Signaling. Journal of molecular endocrinology, 60(1), R1-R8. https://doi.org/10.1530/JME-17-0151

[71] Yunn, N.-O., Kim, J., Ryu, S. H., & Cho, Y. (2023). A stepwise activation model for the insulin receptor. Experimental & Molecular Medicine, 55(10), 2147-2161. https://doi.org/10.1038/s12276-023-01101-1

[72] Pei, J., Wang, B., & Wang, D. (2022). Current Studies on Molecular Mechanisms of Insulin Resistance. Journal of Diabetes Research, 2022, 1863429. https://doi.org/10.1155/2022/1863429

[73] Zhao, X., An, X., Yang, C., Sun, W., Ji, H., & Lian, F. (2023). The crucial role and mechanism of insulin resistance in metabolic disease. Frontiers in Endocrinology, 14, 1149239. https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1149239

[74] Choi, E., & Bai, X. (2023). Activation mechanism of the insulin receptor: A structural perspective. Annual review of biochemistry, 92, 247-272. https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-052521-033250

Material suplementario

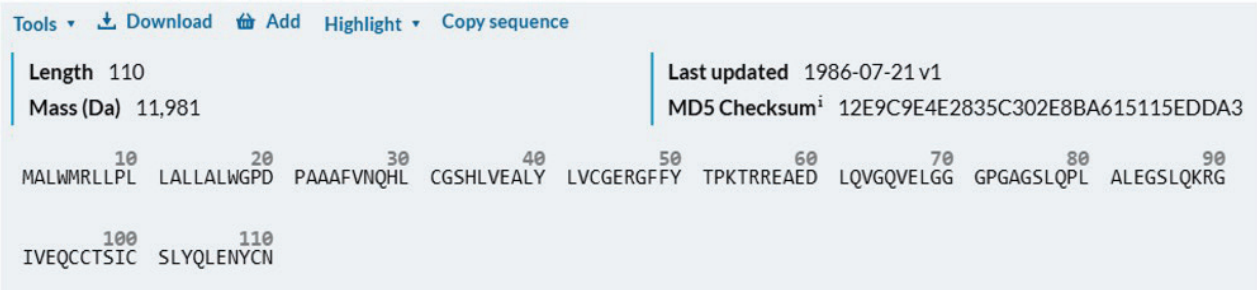


Figura S1. Secuencia de aminoácidos del gen de insulina A humana. Obtenida de https://www.uniprot.org/, accesado en febrero 2020.

Nucleotide Sequence (333 nt):

ATGGCCCTGTGGATGCGCCTCCTGCCCCTGCTGGCGCTGCTGGCCCTCTGGGGACCTGACCCAGCCGCAG
CCTTTGTGAACCAACACCTGTGCGGCTCACACCTGGTGGAAGCTCTCTACCTAGTGTGCGGGGAACGAGG
CTTCTTCTACACACCCAAGACCCGCCGGGAGGCAGAGGACCTGCAGGTGGGGCAGGTGGAGCTGGGCGGG
GGCCCTGGTGCAGGCAGCCTGCAGCCCTTGGCCCTGGAGGGGTCCCTGCAGAAGCGTGGCATTGTGGAAC
AATGCTGTACCAGCATCTGCTCCCTCTACCAGCTGGAGAACTACTGCAACTAG

Translation (110 aa):

MALWMRLLPLLALLALWGPDPAAAFVNQHLCGSHLVEALYLVCGERGFFYTPKTRREAEDLQVGQVELGG
GPGAGSLQPLALEGSLQKRGIVEQCCTSICSLYQLENYCN

Figura S2. Secuencias de nucleótidos y aminoácidos para la proteína insulina humana. Obtenidos de la base de datos CCDS.



Figura S3. Secuencia de nucleótidos de insulina humana optimizada mediante la herramienta Codon Optimization Tool (IDT,USA).

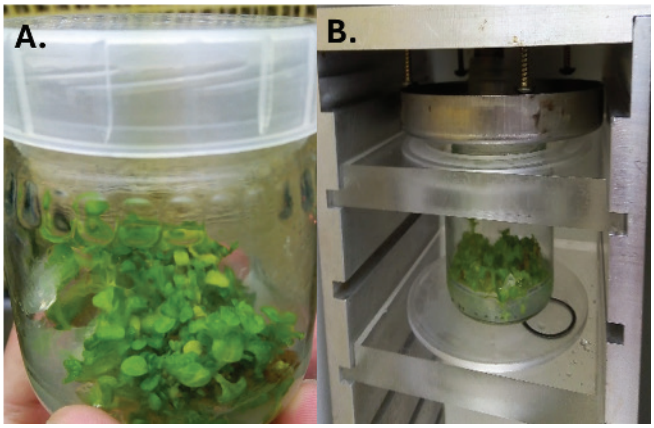


Figura S4. Transformación genética de plantas de tabaco (N. tabacum). A. Material vegetal empleado previo a bombardeo. B. Sistema de biobalística ensamblado para bombardeo dentro de cámara de flujo laminar. Laboratorio de Biotecnología de Plantas del ITCR, San Carlos.

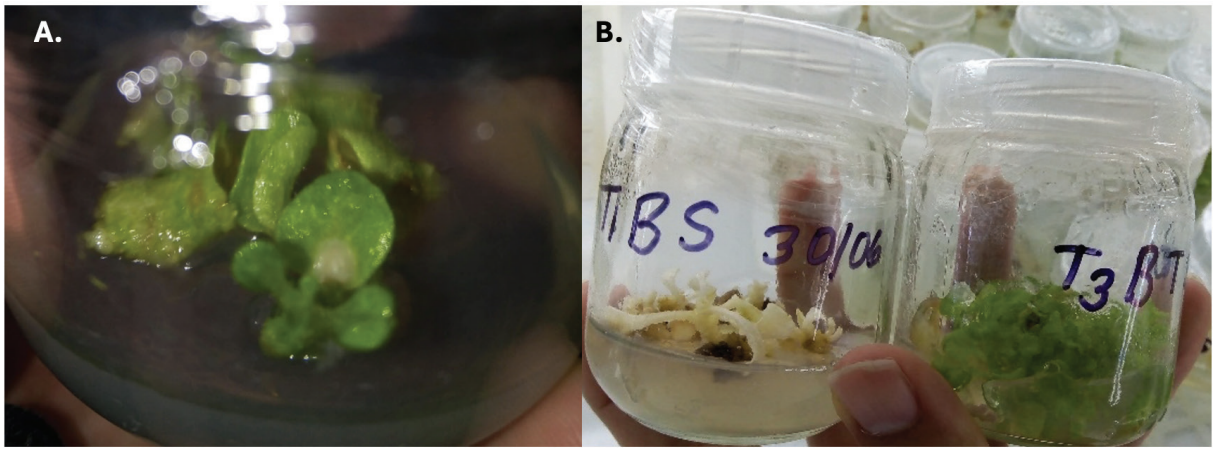


Figura S5. Control de la transformación genética de tabaco (N. tabacum) con los genes de insulina. A. Material vegetal subcultivado 15 días después de bombardeo con el ADN transformante, en medio RMOP con espectinomicina. B. Material vegetal no transformado, en medio RMOP con espectinomicina y material vegetal en medio RMOP sin antibiótico. Condiciones de crecimiento de 25°C e intensidad lumínica de 120 µmol/m2/s por 16h. Laboratorio de Biotecnología de Plantas del ITCR, San Carlos.

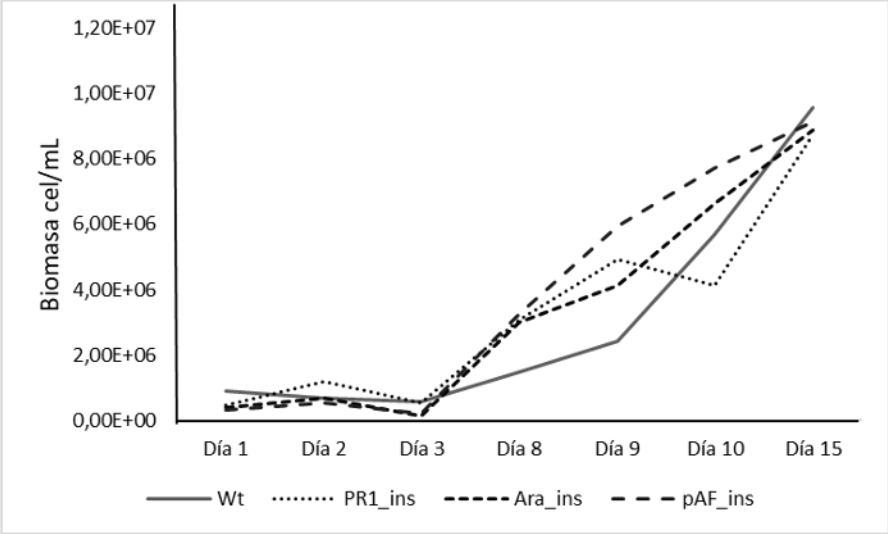


Figura S6. Curvas de crecimiento de las suspensiones celulares a partir de callo de N. tabacum in vitro a partir de explantes de hoja, incubado en condiciones de oscuridad, con un medio MS completo, a partir del día 15 se presentó contaminación y muerte celular. Centro de Investigación en Biotecnología. ITCR, Cartago.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Estudio exploratorio para la minería electroquímica de magnesio en salmueras marinas de Abangares

Exploratory study for the electrochemical mining of magnesium in marine brines of Abangares

Monserrat Brenes-Granados[1], Jairo García-Céspedes[2], Diego González-Flores[3]

Fecha de recepción: 13 de mayo, 2025
Fecha de aprobación: 1 de septiembre, 2025

Brenes-Granados, M; García-Céspedes, J; González-Flores, D. Estudio exploratorio para la minería electroquímica de magnesio en salmueras marinas de Abangares. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 1. Enero-Marzo, 2026. Pág. 74-90.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i1.7986

1 Centro de Electroquímica y Energía Química (CELEQ), Escuela de Química, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
monsof25@gmail.com
https://orcid.org/0009-0003-7205-7380
2 Laboratorio de Geoquímica, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
jairo.garcia@ucr.ac.cr
https://orcid.org/0009-0001-2933-0287
3 Centro de Electroquímica y Energía Química (CELEQ), Centro de Investigación en Ciencia e Ingeniería de Materiales (CICIMA), Escuela de Química, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
diegoandres.gonzalez@ucr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0002-0403-2494

Palabras clave

Minería de salmueras; precipitación electroquímica; magnesio, agua marina.

Resumen

En el distrito de Colorado de Abangares en Guanacaste, Costa Rica, hay una producción importante de sal y gran parte de ella se realiza mediante secado al sol. Además del producto principal que es el cloruro de sodio, se pueden extraer otros sub-productos a partir de las salmueras concentradas por precipitación electroquímica. Para explorar esta opción, se toman muestras de las salmueras de algunas salineras locales. Estas salmueras tienen valores muy elevados de salinidad en el ámbito entre (100-340) PSU y de pH entre (8-15), son ricas en magnesio, pobres en calcio y tienen un contenido de litio muy bajo como para poder explotarse comercialmente. El producto principal de la precipitación electroquímica de las salmueras es el hidróxido de magnesio $Mg(OH)_2$, con un costo de producción estimado de unos 0,036 USD por gramo para la electrólisis propuesta en este estudio.

Keywords

Brine mining; electrochemical precipitation; magnesium; seawater.

Abstract

In the Colorado de Abangares district of Guanacaste, Costa Rica, there is significant salt production, much of which is carried out by sun drying. In addition to the main product, sodium chloride, other by-products can be extracted from the concentrated brines by electrochemical precipitation. To explore this option, brine samples are taken from several local salt mines. These brines have very high salinity values between (100-340) PSU and basic pH values between (8-15). They are rich in magnesium, poor in calcium, and have a lithium content too low to be commercially exploitable. The main product of electrochemical precipitation of the brines is magnesium hydroxide $Mg(OH)_2$, with an estimated production cost of about USD 0.036 per gram for the electrolysis proposed in this study.

Introducción

En el distrito de Colorado de Abangares en Guanacaste, Costa Rica, hay varias cooperativas locales –dedicadas a la producción de sal de cocina– que pretenden diversificar sus actividades comerciales. En particular, estas cooperativas buscan cómo obtener, además de la sal, otros productos minerales a partir de las salmueras concentradas que puedan ser explotados comercialmente.

Una parte importante de la producción de sal de cocina en Costa Rica se lleva a cabo según el método tradicional: el secado al sol del agua de mar para obtener la sal sólida (cloruro de sodio) y una salmuera muy concentrada. La producción de sal en Costa Rica se basa en dos procesos, uno de sal cruda y otro de sal cocinada [1]. El proceso de producción de sal cruda inicia con la eliminación del manglar para crear una pila o pozo (agua de pozo) que luego se llena con el agua de mar empujada por la marea alta. Por bombeo mecánico a través de mangueras se lleva hacia un sistema escalonado de pilas de cristalización en el que se aumenta la salinidad en cada paso debido a la remoción del agua por la evaporación provocada por la energía solar radiante. Cuando se alcanzan valores de salinidad entre el 75 % y el 85 % ocurre el proceso de

cristalización (Figura S1a) [2]. A partir de este momento se acumula una salmuera residual en las pilas –que los productores denominan lejía normal por venir del proceso de sal cruda– que se caracteriza por ser la más concentrada de todo el proceso.

Para elaborar la sal cocinada se utilizan bombas para trasvasar la salmuera concentrada –a un 75 % u 85 % de salinidad– a un contenedor metálico colocado sobre un horno de barro que se alimenta con la quema de leña (Figura S1), en el que se mantiene el fuego encendido entre ocho y doce horas para obtener un residuo conocido como lejía cocinada.

La extracción de minerales como el magnesio se realiza con técnicas que conllevan tanto un alto consumo energético como una alta generación de dióxido de carbono CO_2 [3]. Debido a esto, existe un gran interés en desarrollar alternativas que conlleven a una minería más amigable con el ambiente. Puesto que el mar es ubicuo, se ha propuesto utilizar el agua de mar como una fuente de la que podrían extraerse elementos de interés comercial [4]. Por ejemplo, se estima que el magnesio es el tercer ion con mayor concentración en el agua de mar y que las salmueras concentradas de agua de mar se caracterizan por poseer concentraciones altas de los iones sodio, potasio, cloruro, sulfato y, especialmente, de magnesio cuyos valores pueden ir desde [0,03 a 30,9] g/L, además de contener litio con valores entre [0,23 a 1,5] g/L y calcio de 0,02 a 39 g/L [5]. En Colombia, por ejemplo, ya se ha propuesto utilizar el agua de mar como fuente de magnesio [6]. Mientras que, en los Estados Unidos, el magnesio ha sido incluido en la lista de minerales críticos para la producción doméstica [7],[8].

Dentro de las tecnologías más aceptables para la extracción y precipitación de algunas sales a partir de agua de mar o de salmueras marinas reales o simuladas se encuentran los métodos electroquímicos, entre los que se destacan la electrólisis y la electrodiálisis [9], [10], [11], [12], [13], mientras que este trabajo se enfoca en la electrodeposición.

Uno de los retos para extraer magnesio de agua marina es que la similitud de algunas de sus propiedades comparadas con las del calcio puede complicar su separación. Algunos autores mencionan que se realiza la precipitación de dos maneras. En una se precipita primero el $Mg(OH)_2$ proceso que se favorece al des airear la disolución y mantener el pH entre 10 y 12 [14] [15]. En contraste, en la otra manera, se realiza precisamente lo contrario: se forma el precipitado de $CaCO_3$, promovido por la inyección de CO_2 y luego se procede con la precipitación del $Mg(OH)_2$ [16].

Diferentes investigaciones se han enfocado en estudiar los parámetros que determinan la precipitación de minerales. Por ejemplo, se ha identificado que el material de los electrodos puede ser clave en la precipitación [17]. También se ha visto que el área superficial de los electrodos y la agitación puede acelerar la precipitación de minerales en forma de carbonatos [18]. Además, se ha identificado que el voltaje puede regular si se obtiene $CaCO_3$ o $Mg(OH)_2$ como producto durante la electrólisis [17]. La densidad de corriente incluso juega un papel fundamental durante la precipitación. Por ejemplo, en el caso de la precipitación de $Mg(OH)_2$ la rapidez de la deposición crece de forma directamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad de corriente y es independiente del voltaje aplicado [19] [20]. Por otro lado, las densidades de corriente superiores a 7 A/m^2 desfavorecen el crecimiento del precipitado sobre el electrodo [21]. El pH es un factor que debe ajustarse durante la precipitación de $Mg(OH)_2$. Se ha documentado que la ventana óptima de precipitación es a un pH entre 9 y 11 [21]. Por último, la proporción de magnesio y calcio puede afectar directamente los productos. Por ejemplo, la presencia de magnesio o sulfatos puede inhibir la precipitación de calcita [22].

El desarrollo de procesos para la extracción de minerales podría diversificar las actividades productivas en regiones costeras. Justamente por ello, en este estudio se pretende caracterizar una serie de salmueras provenientes del proceso de extracción de sal en Abangares,

Guanacaste, Costa Rica para usarse como posibles fuentes de magnesio. Asimismo, plantear una metodología para extraer sales de magnesio y generar una nueva fuente de recursos por medio de una metodología electroquímica de precipitación.

Materiales y métodos

Muestreo de salmueras

El muestreo se realizó en Guanacaste, Costa Rica en el distrito de Colorado de Abangares en fincas dedicadas a la producción de sal (Figuras S1 y S2), el día 10 de febrero del 2022; la elección de las fincas se hizo de forma aleatoria y las muestras fueron tomadas por el equipo de trabajo en botellas de polipropileno y llevadas al laboratorio donde se almacenaron a temperatura ambiente (25-30°C) hasta el momento del ensayo. La salmuera se obtiene de unas salinas, las cuales son una serie de cuerpos de agua, en pilas o lagunas, en las que se aísla el agua de mar hasta que se evapora y se obtiene cloruro de sodio: la sal común o sal de mesa [1].

Se tomaron muestras de las salmueras del agua de pozo, es decir, las salmueras crudas tomadas de forma directa de la pileta inicial, del proceso de sal cruda y de sal cocinada, con especial énfasis en las salmueras identificadas como “Santos Prieto Lejía Cocinada”, “Bernio Garay Lejía Normal” y “Diana Colorado Lejía Cocinada”.

Determinación de la salinidad y del pH de las salmueras

En el Laboratorio de Acidificación Oceánica del Centro de Investigación en Ciencias del Mar (CIMAR) de la Universidad de Costa Rica (UCR) se midió la salinidad electroquímicamente –en unidades PSU (Unidades Prácticas de Salinidad)– con un conductivímetro marca Thermo Scientific, modelo Orion, y una celda de conductividad de constante 0,475 cm^{-1} Orion DuraProbe; este equipo fue previamente calibrado con patrones. También se determina el pH espectrofotométricamente por cromogénesis con m-cresol, el cual es un método utilizado frecuentemente en muestras marinas [23], [24] que consiste en realizar dos adiciones de m-cresol, seguidas de la medición de la absorbancia de la muestra a tres longitudes de onda diferentes: 730 nm, 578 nm y 434 nm; estas se realizaron en un espectrofotómetro marca Ocean Optics, modelo FLAME-S-VIS-NIR-ES, con una fuente de luz halógeno Ocean Optics, HL-2000-FHSA-LL; un portacubeta con tapa Ocean Optics modelo CUV-UV-10, que posee además fibra óptica modelo QP200-2-VIS-BX; para el cálculo de pH se utilizaron los valores de salinidad, se sigue el método indicado en Berghoff CF (2020) [25] y el software Oceanview®.

Caracterización por cromatografía iónica

Las muestras se analizan por cromatografía iónica tanto antes como después del proceso de precipitación electroquímica. Se utilizan dos diferentes cromatógrafos de iones. El primero es un cromatógrafo Dionex ICS-3000 del Laboratorio de Geoquímica Volcánica del OVSICORI-UNA. Los aniones (F^-, Cl^-, Br^- y SO_4^{-2}) se analizaron mediante una columna Dionex IonPac™ AS23, con un supresor Dionex ASRS™ 300 y una solución 9 mM de Na_2CO_3 como eluente. Los cationes (Li^+, Na^+, K^+, Mg^{2+} y Ca^{2+}) se analizaron mediante una columna Dionex IonPac™ CS12, con un supresor Dionex CSRS™ 300 y una solución de 20 mM de ácido metanosulfónico. Las curvas de calibración, tanto de aniones como de cationes, se prepararon con estándares de 5, 10, 25, 50, 100, 150, 200 y 250 mg/l. Las muestras se diluyeron alrededor de cien veces antes de los análisis.

El segundo es un cromatógrafo Metrohm IC 881 Pro con detector de conductividad, calibrado previamente con patrones preparados a partir de sales; para la determinación de la concentración de aniones –fluoruro, cloruro, nitrito, nitrato, fosfato, sulfato– se usa como

eluente una disolución acuosa de carbonato de sodio y bicarbonato de sodio, además de una columna Metrosep A Supp 5; mientras que para la determinación de la concentración de cationes –litio, sodio, potasio, amonio, calcio, magnesio– se usa como eluente una disolución acuosa de ácido dipicolínico y ácido nítrico, que pasa por una columna Metrosep C 4; como blanco de laboratorio se usa agua con resistividad 18,2 MΩ-cm obtenida de un ultrapurificador Millipore Milli-Q Direct 8. Para diluir las muestras se utiliza una balanza Sartorius Cubis® de cinco decimales y se utilizan factores de dilución de 500, 400 y 200 para cada analito; en el caso del litio se usa un factor de dilución de 100.

Cristalografía de Rayos X

Se realizó en la Unidad de Difractometría de la Escuela de Química de la UCR con un equipo Bruker AXS-D8 Advance con un tubo de rayos X de cobre utilizando un espejo Göbel y un detector Lynx-Eye. Se utiliza un acoplamiento bloqueado de 2Θ = 10° a 70° en incrementos de 0,019° y un tiempo equivalente de 768 s por paso.

Espectroscopia infrarroja

Se realizó en el cuarto de Instrumentos del Centro de Electroquímica y Energía Química de la Universidad de Costa Rica para obtener información sobre los grupos funcionales presentes en el precipitado mediante espectroscopia infrarroja en modo ATR-FTIR en un equipo marca Thermo Scientific Nicolet 6700 en modo ATR utilizando un cristal de diamante.

Electrodo de trabajo

Para la precipitación electroquímica se utilizaron electrodos separados de malla de platino de la empresa Heraeus Vectra do Brasil EL 04/1 de platino/Iridio 90:10, se utilizó como cátodo el electrodo cilíndrico y como ánodo un electrodo plano cuadrado. En el material suplementario se puede encontrar información sobre el cálculo del área del electrodo.

Precipitación electroquímica

Para llevar a cabo la precipitación electroquímica de magnesio, calcio y litio a partir de las salmueras, se dividió el proceso en dos etapas electrolíticas realizadas secuencialmente, tal y como se indica en la Figura 1.

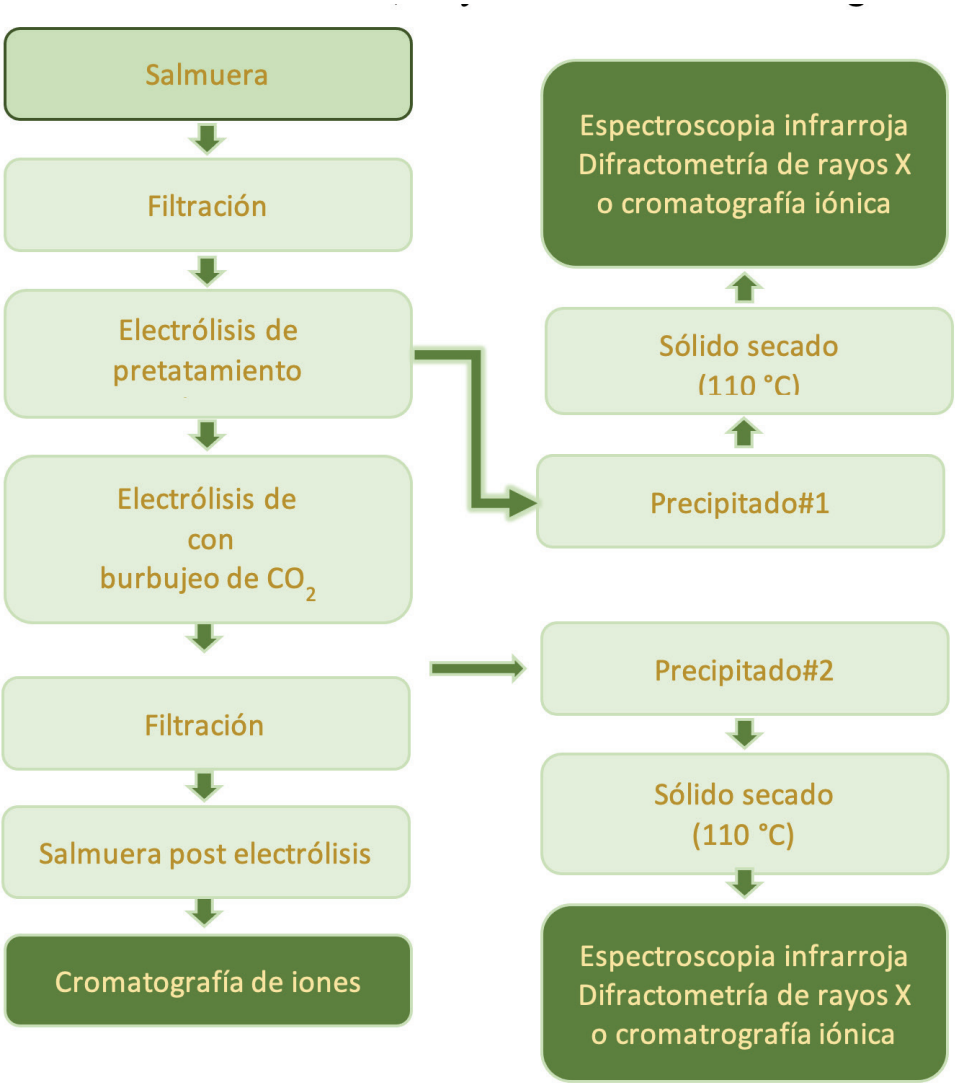


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso aplicado a las muestras de salmueras. Un esquema de los sistemas utilizados se muestra en la Figura S3.

Con un papel de filtro Whatman® grado 4 (tamaño de retención de 20 - 25 µm) de 125 mm de diámetro, se filtran las muestras de las salmueras. Un volumen de 800 mL del filtrado se recoge en un beaker de 1 L para hacer la precipitación. Se utilizó una fuente de poder Keysight E3633A con capacidad de dar 8 V y 20 A. Los electrodos utilizados son electrodos separados de malla de platino y se lavaron con agua desionizada antes de sumergirlos en la salmuera. El proceso de electrólisis se realiza en el Laboratorio LabVolta de la Universidad de Costa Rica, dentro de una capilla de extracción de gases, puesto que se genera gas cloro Cl_2 debido a la presencia de cloruro de sodio NaCl. El proceso global de electrólisis duró tres horas y se mantuvo continuamente la disolución en agitación con una velocidad de 600-650 rpm. El esquema gráfico se puede visualizar en la Figura 1.

En este trabajo se realiza una primera precipitación para separar el magnesio y luego inyectar CO_2 para precipitar el calcio. La primera electrólisis es denominada electrólisis de pretratamiento y se efectúa para separar los precipitados de magnesio que se identificaron como precipitado#1. La disolución se filtra para aislar el precipitado#1, este sólido se seca a 110 °C por tres horas en una estufa al vacío Thermo Scientific Lab-Line EM 2466, se tomaron las muestras necesarias

para el análisis por difractometría de rayos X y por espectroscopía infrarroja y el material restan se almacenó en viales. La masa del precipitado obtenido se determinó en una balanza Ohaus Scout Pro del laboratorio del CELEQ.

La segunda electrólisis se llevó a cabo en la disolución obtenida durante la primera electrólisis. Se agrega un burbujeo continuo de dióxido de carbono con un cilindro de CO_2 a 1000 psi para propiciar la formación de los carbonatos de los elementos de interés (litio y calcio) de acuerdo con lo recomendado por H. Xie et al.[14]. Al finalizar esta segunda etapa se obtiene la salmuera post-electrólisis –que se analizó por cromatografía líquida (iónica)–y el precipitado#2, también sólido, fue secado a 110 °C por tres horas en una estufa al vacío Thermo Scientific Lab-Line EM 2466 y posteriormente analizado por difractometría de rayos X y espectroscopia infrarroja.

Optimización de la precipitación electroquímica

Para optimizar los parámetros del proceso de precipitación electroquímica se realizó un estudio con el fin de determinar cuáles son las condiciones más favorables de ciertas variables. Entre las variables a considerar están: los valores de voltaje de [3 – 4] V, el uso de CO_2, el efecto de la dilución de la salmuera, la densidad de corriente y el tipo de electrodo (concéntrico o separado).

Se realiza esta optimización en la salmuera Diana Colorado lejía cocinada. El sistema se configura similarmente a los pasos descritos en la sección anterior con las siguientes modificaciones: a la salmuera filtrada se le aplican 5 A (0,230 A/cm^2) por cuatro horas para obtener el precipitado#1 que se separa; se continua con la segunda electrólisis por otras cuatro horas más con burbujeo de CO_2, al final de la cual se obtiene el precipitado#2. Para caracterizar este proceso se analiza la salmuera postelectrólisis por cromatografía iónica, los dos precipitados obtenidos se analizan mediante cristalografía de rayos X y espectroscopia infrarroja. A fin de conocer si los iones magnesio, calcio o litio o están presentes en el precipitado o en la salmuera, se preparan varias disoluciones a partir del precipitado #1 y otras a partir del precipitado #2 que luego fueron analizadas por cromatografía iónica; para ello se disuelven 2 g de precipitado en 250 mL de agua desionizada.

Resultados

Todas las salmueras tienen un pH extremadamente básico con valores que van de 14,980 a 15,734 y con una salinidad alta que va de 330,5 PSU a 340,8 PSU. Estos datos se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Determinación del pH y la salinidad de muestras de las salmueras del distrito Colorado de Abangares tomadas en abril de 2021.

Nombre de la muestra	pH	Incertidumbre expandida del pH	T (°C)	Salinidad (PSU)
Santos Prieto lejía cocinada	14,980	0,008	25,0	330,5
Santos Prieto Agua de Pozo	9,814	0,006	25,6	194,7
Santos Prieto lejía normal	15,280	0,007	25,2	333,9
Bernio Garay Lejía normal	15,734	0,007	25,2	340,8
Bernio Garay Agua de Pozo	8,905	0,007	25,7	172,5
Diana Colorado Agua de Pozo	15,161	0,007	25,4	328,8
Diana Colorado lejía cocinada	15,227	0,009	25,2	334,4

Ensayos realizados en el Laboratorio de Acidificación Oceánica del Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR) de la Universidad de Costa Rica (UCR).

Los resultados de los análisis por cromatografía iónica de las salmueras antes de los ensayos electroquímicos se muestran en los Cuadros 3 y 4.

En general se observa que las muestras de pozo presentan una concentración menor de sales respecto a las lejías, debido a esto se hizo la precipitación electroquímica en las muestras de lejía de las fincas de Diana Colorado, Bernio Garay y Santos Prieto. Es notorio que las muestras de lejía tengan una concentración bastante baja de calcio respecto a las aguas de pozo (Cuadro 4), debido a precipitación del carbonato de calcio durante la producción de la sal. Esto representa una gran ventaja para los objetivos de este trabajo, ya que normalmente el calcio y el magnesio pueden precipitar simultáneamente o interferir uno en la precipitación del otro.

Cuadro 3. Determinación por cromatografía iónica de la concentración (mg/L) de iones en las salmueras de agua de pozo de Colorado de Abangares en 2021.

Salmuera	Bernio Garay agua de pozo FD 434	Diana Colorado agua de pozo FD 481	Santos Prieto agua de pozo FD 516
Magnesio (±30)	6090	NR	6780
Calcio (±30)	1400	(282,6±0,6)x100	1190
Sodio x 10^2 (±4)	466	831	526
Potasio x 10 (±3)	167	260	180
Cloruro x 10^3 (±2)	121	221	-
Sulfato x 10^3 (±0,3)	9,9	17,2	-
Fluoruro	< 79	< 87	-
Nitrito	< 320	< 350	-
Nitrato	< 360	< 400	-
Fosfato	< 1800	< 2000	-
Amonio	< 19	< 21	< 23
Litio	nd	nd	nd

Ensayos realizados en el Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica (UCR).
NR: Pico no resuelto en el cromatograma,
nd: por debajo del límite de detección.

Cuadro 4. Determinación por cromatografía iónica de la concentración (mg/L) de iones en las salmueras de Colorado de Abangares en 2021.

Salmuera	Santos Prieto lejía cocinada [a]	Santos Prieto lejía normal [b]	Bernio Garay lejía normal	Diana Colorado lejía cocinada
Litio (± 0,4)	2,2	2,8	4,3	2,3
Sodio x 10^4 (± 0,5 x 10^3)	5,1	3,9	3,2	5,6
Potasio x 10^4 (± 0,08 x 10^4)	1,16	1,38	1,43	1,21
Calcio ± 2	24	7	2,3	4,4
Magnesio x 10^4 (± 0,4x10^4)	4	4,9	5,4	4,7
Cloruro x 10^5 (± 0,2 x 10^5)	1,4	1,7	1,5	1,6
Sulfato x 10^4 (± 0,6 x 10^4)	3,8	6,5	5	4,5

Ensayos realizados en el Laboratorio de Geoquímica Volcánica del Instituto Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OVSICORI) de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA).
a: la lejía cocinada se refiere al proceso que involucra evaporación con leña.
b: la lejía normal se refiere al proceso que se realiza por evaporación por secado al sol.

Resultados de condiciones de precipitación por electrólisis

Si bien para realizar la precipitación de las salmueras se pueden utilizar electrodos concéntricos, estos hacen más difícil el control de la corriente, pues alcanzan valores tan altos que no favorecen la precipitación. En cambio, al utilizar electrodos separados se logra un control de la corriente que resulta en corrientes más bajas que sí favorecen la precipitación.

Las mejores condiciones para la precipitación de las salmueras –según el esquema de la Figura 1– se muestran en el Cuadro 5. La precipitación consiste en un pretratamiento de electrólisis sin burbujeo de CO_2 para favorecer la precipitación del magnesio, seguida de una etapa de precipitación con burbujeo de CO_2 para favorecer la formación de carbonatos. Solamente una de las salmueras fue diluida (la salmuera de Santos Prieto Lejía Normal, 200 mL de la muestra en 600 mL de agua desionizada, para un factor de dilución de 3) para evaluar el efecto de la alta salinidad en la precipitación. Se obtuvo que la densidad de corriente para la salmuera diluida es de 0,073 A/cm^2 y para las salmueras sin diluir de 0,200 A/cm^2. En general, las salmueras sin diluir presentan una mayor precipitación de producto por la mayor concentración de sales.

Cuadro 5. Parámetros empíricos durante la electrólisis de precipitación de las salmueras de Colorado de Abangares según se describe en el diagrama de la Figura 1.

Salmuera	Santos Prieto lejía normal diluida	Diana Colorado lejía cocinada	Bernio Garay lejía normal	Santos Prieto lejía cocinada
Voltaje (V)	6 – 5	8 – 6	8,8	8 – 7
Corriente (A)	1,55	5,556	5,543	5 – 4
Densidad de corriente (A/cm^2)	0,073	0,260	0,260	0,234
Tiempo (minutos)	180	180	180	180
Masa (g) del precipitado	1,1	7,3	2,6	7,1

Ensayos realizados en el Laboratorio de LabVolta del CELEQ de la Universidad de Costa Rica.
a: la lejía cocinada se refiere al proceso que involucra evaporación con leña.
b: la lejía normal se refiere al proceso que se realiza por evaporación por secado al sol.

Resultados de la caracterización de precipitados por IR y Rayos X

Se caracterizaron los precipitados obtenidos por espectroscopía infrarroja y análisis de rayos X de polvos. El análisis de los espectros de infrarrojo de los precipitados obtenidos de las salmueras muestra señales de grupos O-H, C-O y M-O, como se indica en la Figura 2a [26]. Los difractogramas de rayos X de estos precipitados obtenidos presentan picos de mayor intensidad correspondientes a $Mg(OH)_2$ y a NaCl (Figura 2b), con lo que se tiene que el precipitado obtenido se compone principalmente de una mezcla de ambos compuestos. Se concluye entonces que debido a la alta proporción Mg:Ca, se favorece siempre la precipitación de $Mg(OH)_2$ (precipitado#2 de Figura 1) aunque se utilice CO_2. Por lo tanto, la salmuera tiene potencial para usarse como una buena fuente de magnesio al seguir este procedimiento.

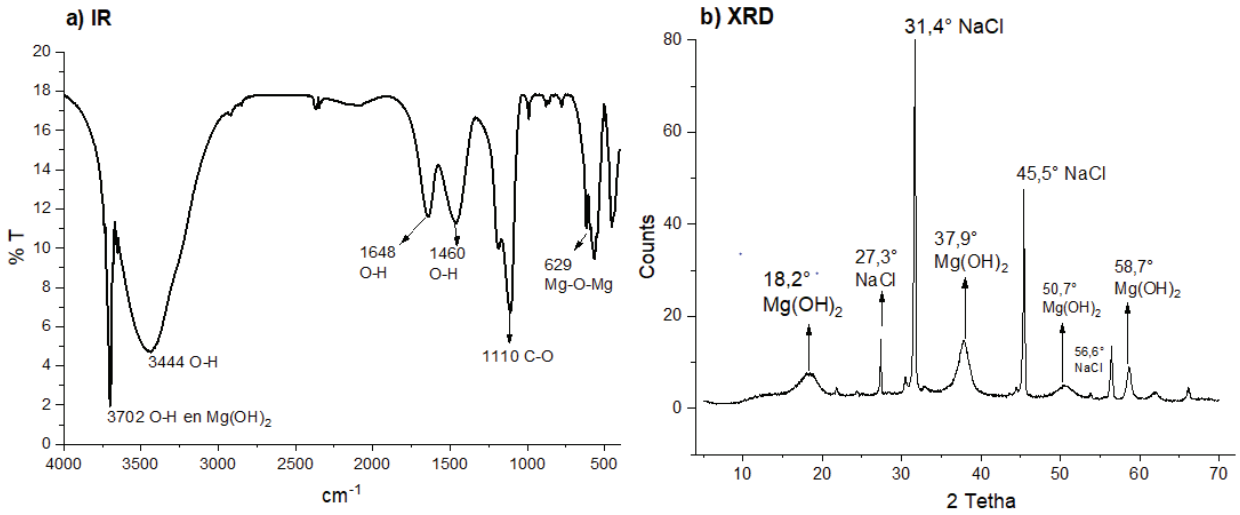


Figura 2. Caracterización del precipitado#1 (Figura 1) de la muestra de salmuera Diana Colorado Lejía Cocinada por medio de a) espectroscopia infrarroja ATR-FTIR y b) difractometría de rayos X de polvos.

Resultados de la caracterización de salmueras post electrólisis

La caracterización de las salmueras post-electrólisis se hizo por cromatografía iónica posterior al proceso de electrólisis por tres horas y se enseñan los resultados en el cuadro 6. Se observa que luego de la electrólisis permanece una concentración de magnesio significativa en estas salmueras que podría aprovecharse si se aplica la electrólisis por un intervalo mayor de tiempo.

Cuadro 6. Determinación de la concentración (mg/L) de las especies iónicas mayoritarias en salmueras después de hacer la electrólisis por tres horas.

Salmuera	Santos Prieto lejía cocinada	Bernio Garay lejía normal	Diana Colorado lejía cocinada
Litio	3,3 ± 0,3	3,1 ± 0,3	1,5 ± 0,3
Sodio	(5,6 ± 1) x 10^3	(36 ± 7) x 10^3	(58 ± 11) x 10^3
Potasio	335 ± 67	(15 ± 3) x 10^3	(12,4 ± 2,4) x 10^3
Calcio	2,6 ± 3	2,1 ± 0,2	29 ± 3
Magnesio	(1,1 ± 0,1) x 10^3	(58 ± 6) x 10^3	(44,9 ± 4,4) x 10^3
Cloruro	(1,4 ± 0,1) x 10^3	(170 ± 17) x 10^3	(153 ± 15) x 10^3
Sulfato	278 ± 56	(57 ± 11) x 10^3	(43 ± 11) x 10^3

Ensayos realizados en el Laboratorio de Geoquímica Volcánica del Instituto Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OVSICORI) de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA).
a: la lejía cocinada se refiere al proceso que involucra evaporación con leña.
b: la lejía normal se refiere al proceso que se realiza por evaporación por secado al sol.

Resultados de la electrólisis de optimización

Para evaluar el efecto del CO_2, se aplicó una electrólisis optimizada (5 A, 4 horas) a la muestra de la salmuera Diana Colorado, porque es la muestra con la mayor concentración de magnesio. Los resultados se presentan en el Cuadro 7.

En la electrólisis de optimización de condiciones se aplicó una corriente de 5 A por cuatro horas para una densidad de corriente similar a las pruebas de precipitación electroquímica iniciales, con valores de 0,230 A/cm^2 (Cuadro 5). Con estas modificaciones se obtuvo hasta el triple de la cantidad de precipitado #1 y #2 que habían sido obtenidos al aplicar la electrólisis por solamente tres horas.

El resultado de los espectros de infrarrojo del precipitado#1 (sin uso de CO_2) y del precipitado#2 (con uso de CO_2) indica señales sugerentes de grupos OH, C-O y de M-O; mientras que los difractogramas de rayos X de los precipitados obtenidos de este proceso mostraron señales que indican que están presentes el hidróxido de magnesio y el cloruro de sodio en ambos, igual que en los anteriores. No se observan diferencias por el uso de CO_2 en los precipitados y no hubo evidencia de señales de otros compuestos en la muestra, lo cual indica que la precipitación podría realizarse sin uso de CO_2.

En las disoluciones elaboradas con los precipitados #1 y #2 hay una alta concentración de cationes sodio y magnesio, junto con los aniones bromuro, sulfato y potasio. Estos datos se presentan en el Cuadro 7. La distribución de magnesio en el proceso optimizado muestra que los precipitados recuperan conjuntamente 2,8% del magnesio inicial (1,35% en precipitado #1 y 1,46% en precipitado #2), permaneciendo el 91% en la salmuera post-electrólisis. Se observa un incremento en la concentración de calcio en ambos precipitados, atribuible a la contaminación durante el proceso. Lo anterior indica que las salmueras estudiadas poseen potencial para la extracción de magnesio en forma de $Mg(OH)_2$. Las concentraciones de litio –[1,8-4,3] mg/L en las salmueras iniciales– son insuficientes para justificar la explotación comercial por este método.

Cuadro 7. Determinación de la concentración (mg/L) de las especies iónicas mayoritarias en la muestra de la salmuera Diana Colorado en los diferentes productos obtenidos durante la electrólisis de cuatro horas.

Muestra	Litio (± 0,1)	Sodio (± 689) (± 695) (± 11816)	Potasio (± 40) (± 38) (± 2690)	Calcio (± 14) (± 10) (± 4)	Magnesio (± 203) (± 215) (± 4265)	Cloruro (± 523) (± 653) (± 14898)	Sulfato (± 128) (± 155) (± 9697)
precipitado#1 sin CO2	1,4	3446	199	139	2028	5226	641
precipitado#2 con CO2	1,1	3474	189	101	2150	6534	773
lejía cocinada post electrólisis 4 horas	1,8	59081	13452	43	42650	148981	48484

Ensayos realizados en el Laboratorio de Geoquímica Volcánica del Instituto Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OVSICORI) de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA).
La electrólisis optimizada por cuatro horas se hizo según el procedimiento indicado en el diagrama de la figura 1.

Un balance de masa y energía se muestra en el Cuadro 8. Inicialmente en la salmuera hay una cantidad de 37 g de magnesio y de esta salmuera se obtiene una cantidad de 16,8 g de $Mg(OH)_2$ con la primera electrólisis y luego 20,6 g en la segunda electrólisis. A pesar de esto,

aún sigue quedando magnesio remanente en disolución que se podría continuar aprovechando. Se estima, además, que el costo de producción por gramo de magnesio para este proceso sería de $0,036USD/g.

Cuadro 8. Balance de masa y energía para la obtención de magnesio a partir de la electrólisis de la salmuera Diana Colorado Lejía Cocinada de Colorado de Abangares.

Etapa	Magnesio (g)	Masa Precipitado $Mg(OH)_2$ (g)	Tiempo (h)	Energía (kWh)	Costo ($/g Mg)	Observaciones
Salmuera inicial	37	-	-	-	-	Material de partida
↓ Electrólisis pretratamiento (5A, 4h)	Primera precipitación					
Precipitado #1	0.5	16.8	4	0.14	0.036	Recuperación: 1.35% Mg
↓ Filtración						
↓ Electrólisis con CO_2 (5A, 4h)	Segunda precipitación					
Precipitado #2	0.54	20.6	4	0.14	0.036	Recuperación: 1.46% Mg
↓ Filtración						
Salmuera post-electrólisis	34	-	-	-	-	Material final para recuperación

Según el procedimiento descrito en la Figura 1.
Otros metales como el calcio y litio representan menos de un 0,1% de la cantidad de magnesio y por eso no se tomaron en cuenta en el balance de masa.
En la información suplementaria se describe el cálculo del consumo energético.

Para el 2021 se reporta un costo de producción industrial de magnesio de $0,006USD por gramo [27]. Este precio ha oscilado debido a su elevado costo de producción y su dependencia geopolítica porque China ha reducido su producción para alcanzar sus objetivos anuales de emisiones. En comparación, el costo de la electrólisis propuesta en este trabajo (0,036 USD/g) es unas cinco veces mayor, atribuible principalmente a la escala de laboratorio y al uso de condiciones aún no del todo optimizadas. Existen diferentes modificaciones que se podrían realizar en el proceso de electrólisis para mejorar su eficiencia. Por ejemplo, en el trabajo de Sano et al. [15] utilizaron un sistema de electrólisis en flujo continuo con una membrana de intercambio catiónico y reportan un costo de 0,97 USD/kg (0,00097 USD/g) lo que demuestra el potencial de reducción de costos por escalamiento. En esa investigación se reportaron problemas de contaminación por la coprecipitación de $CaCO_3$, sin embargo, en el caso de las salmueras concentradas de Abangares esto no sería un problema ya que la concentración de calcio es muy baja. Los costos de producción podrían reducirse aún más si, por ejemplo, se utilizan electrodos de acero, de mayor área superficial y con energía solar. Todo este proceso se podría adaptar por medio de un diseño experimental de superficie de respuesta para optimizar los costos y sería el enfoque para continuar con esta línea de investigación.

Conclusiones y recomendaciones

Los resultados muestran que los precipitados obtenidos se componen principalmente de una mezcla de hidróxido de magnesio con cloruro de sodio. Debido a que la mayor parte del precipitado obtenido es magnesio –como $Mg(OH)_2$– el cual también es catalogado como un ion de importancia creciente, se puede considerar a estas salmueras como una fuente relevante de magnesio, que se puede destinar para el uso en aplicaciones energéticas y electrónicas. El método aplicado en este trabajo es una estrategia de minería del mar que no requiere del uso de agentes químicos en cantidades excesivas.

Según las pruebas realizadas, no se considera necesario realizar la dilución de la salmuera para el proceso de electrólisis. Tampoco es útil el uso de CO_2 porque no se observa un cambio significativo en la masa del precipitado obtenido. Para propiciar una precipitación mayor de la salmuera se requiere de un área de electrodo mayor y de la aplicación de la electrólisis por un intervalo de tiempo mayor.

En general, las salmueras son una fuente rica de magnesio el cual que puede ser separado de forma bastante selectiva. El precipitado obtenido de estas salmueras está compuesto principalmente por $Mg(OH)_2$ y NaCl, con pequeñas cantidades de litio y calcio, entre otros iones.

El uso de técnicas electroquímicas para la extracción de sales del mar está en constante innovación y su uso va en aumento, esto fomenta aspectos importantes como la reducción o la ausencia de agentes químicos contaminantes.

Las características de las salmueras de la extracción de sal de Colorado de Abangares –tales como su alto contenido de magnesio y su bajo contenido de calcio– hacen favorable la exploración de otros métodos de extracción que puedan a su vez disminuir el costo de producción y lograr que la electrólisis sea más competitiva.

Agradecimientos

Diego González le agradece al posgrado en Química de la Universidad de Costa Rica (UCR), a la Vicerrectoría de Investigación de la misma universidad y al Consejo Nacional de Rectores (CONARE).

Se agradece al equipo del CIMAR involucrado y a Josué Álvarez por la ayuda brindada en el desarrollo de este trabajo.

Se agradece además a Mavis L. Montero del CICIMA, UCR, a Alejandro Rodríguez del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, y a la Cooperativa Nacional de Poductores de Sal, R.L por su apoyo con el muestreo y mediciones.

Se agradece a la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica por su colaboración en los ensayos.

Referencias

[1] A. Valverde-Espinoza, *La ciudad de Puntarenas: Una aproximación a su historia económica y social 1858-1930*, 1st ed. Universidad de Costa Rica, Sede del Pacífico, 2008.

[2] EUsalt, “Harvesting salt by solar evaporation.” Accessed: Oct. 06, 2025. [Online]. Available: https://eusalt.com/about-salt/salt-production/solar-evaporation

[3] G. Feng, N. Zuo-ren, W. Zhi-hong, G. Xian-zheng, and Z. Tie-yong, “Assessing environmental impact of magnesium production using Pidgeon process in China,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, no. 18, pp. 749–754, 2008.

[4] M. S. Diallo, M. R. Kotte, and M. Cho, “Mining Critical Metals and Elements from Seawater: Opportunities and Challenges,” *Environ Sci Technol*, vol. 49, no. 16, pp. 9390–9399, Apr. 2015, doi: 10.1021/acs.est.5b00463.

[5] D. Fontana, F. Forte, M. Pietrantonio, S. Pucciarmati, and C. Marcoaldi, "Magnesium recovery from seawater desalination brines: a technical review," Dec. 01, 2023, *Springer Science and Business Media B.V.* doi: 10.1007/s10668-022-02663-2.

[6] L. F. Berrio-Betancur *et al.*, "Desarrollo de la industria de aleaciones de magnesio en Colombia - una oportunidad," *DYNA (Colombia)*, vol. 84, no. 203, pp. 55–64, Dec. 2017, doi: 10.15446/dyna.v84n203.66440.

[7] E. L. Bray, "2018 Minerals Yearbook MAGNESIUM," 2021. Accessed: Oct. 06, 2025. [Online]. Available: https://pubs.usgs.gov/myb/vol1/2018/myb1-2018-magnesium-metal.pdf

[8] US Department of Energy, "Critical Minerals and Materials," 2018. Accessed: Oct. 26, 2025. [Online]. Available: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2021/01/f82/DOE%20Critical%20Minerals%20and%20Materials%20Strategy_0.pdf

[9] T. Hoshino, "Innovative lithium recovery technique from seawater by using world-first dialysis with a lithium ionic superconductor," *Desalination*, vol. 359, pp. 59–63, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.desal.2014.12.018.

[10] B. S. Oh, S. G. Oh, Y. J. Jung, Y. Y. Hwang, J. W. Kang, and I. S. Kim, "Evaluation of a seawater electrolysis process considering formation of free chlorine and perchlorate," *Desalination Water Treat*, vol. 18, no. 1–3, pp. 245–250, 2010, doi: 10.5004/dwt.2010.1780.

[11] C. Carré, A. Zanibellato, M. Jeannin, R. Sabot, P. Gunkel-Grillon, and A. Serres, "Electrochemical calcareous deposition in seawater. A review," Jul. 01, 2020, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s10311-020-01002-z.

[12] B. S. Lalia and R. Hashaikeh, "Electrochemical precipitation to reduce waste brine salinity," *Desalination*, vol. 498, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.desal.2020.114796.

[13] N. Mahmud, D. V. F. Alvarez, M. H. Ibrahim, M. H. El-Naas, and D. V. Esposito, "Magnesium recovery from desalination reject brine as pretreatment for membraneless electrolysis," *Desalination*, vol. 525, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.desal.2021.115489.

[14] H. Xie *et al.*, "Using electrochemical process to mineralize CO2 and separate Ca2+/Mg2+ ions from hard water to produce high value-added carbonates," *Environ Earth Sci*, vol. 73, no. 11, pp. 6881–6890, Jun. 2015, doi: 10.1007/s12665-015-4401-z.

[15] Y. Sano, Y. Hao, and F. Kuwahara, "Development of an electrolysis based system to continuously recover magnesium from seawater," *Heliyon*, vol. 4, p. e00923, 2018, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00923.

[16] B. S. Lalia, A. Khalil, and R. Hashaikeh, "Selective electrochemical separation and recovery of calcium and magnesium from brine," *Sep Purif Technol*, vol. 264, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.seppur.2021.118416.

[17] C. Barchiche *et al.*, "Characterization of calcareous deposits in artificial seawater by impedance techniques: 3 - Deposit of CaCO3 in the presence of Mg(II)," *Electrochim Acta*, vol. 48, no. 12, pp. 1645–1654, May 2003, doi: 10.1016/S0013-4686(03)00075-6.

[18] F. Souiad *et al.*, "Electrodeposition of calcium carbonate and magnesium carbonate from hard water on stainless-steel electrode to prevent natural scaling phenomenon," *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 19, Oct. 2021, doi: 10.3390/w13192752.

[19] C. H. Díaz Nieto, J. A. Kortsarz, M. L. Vera, and V. Flexer, "Effect of temperature, current density and mass transport during the electrolytic removal of magnesium ions from lithium rich brines," *Desalination*, vol. 529, May 2022, doi: 10.1016/j.desal.2022.115652.

[20] K. Zeppenfeld, "Electrochemical removal of calcium and magnesium ions from aqueous solutions," *Desalination*, vol. 277, no. 1–3, pp. 99–105, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.desal.2011.04.005.

[21] K. Akamine and I. Kashiki, "Corrosion Protection of Steel by Calcareous Electrodeposition in Seawater (Part 1)-Mechanism of Electrodeposition," *Zairyo-to-Kankyo*, vol. 51, pp. 496–501, 2002.

[22] D. Nguyen Dang *et al.*, "Role of Brucite Dissolution in Calcium Carbonate Precipitation from Artificial and Natural Seawaters," *Cryst Growth Des*, vol. 17, no. 4, pp. 1502–1513, Apr. 2017, doi: 10.1021/acs.cgd.6b01305.

[23] M. Gómez Batista *et al.*, "Determinación espectrofotométrica de pH en agua de mar utilizando indicador púrpura de meta-cresol purificado y un espectrofotómetro Ocean Optics. Red de Investigación de Estresores Marinos - Costeros en Latinoamérica y El Caribe – REMARCO," Santa Marta, 2021. Accessed: Oct. 07, 2025. [Online]. Available: https://remarco.org/manual-ao/

[24] X. Li *et al.*, "Purified meta-Cresol Purple dye perturbation: How it influences spectrophotometric pH measurements," *Mar Chem*, vol. 225, p. 103849, 2020, doi: 10.1016/j.marchem.2020.103849.

[25] C. F. Berghoff, "Procedimiento de determinación espectrofotométrica del pH de agua de mar con púrpura de meta-cresol," 2020. Accessed: Oct. 07, 2025. [Online]. Available: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2022/03/berghoff_informe_ases_transf_086_2020_protocolo_ph.pdf

[26] A. Ansari, A. Ali, M. Asif, and Shamsuzzaman, "Microwave-assisted MgO NP catalyzed one-pot multicomponent synthesis of polysubstituted steroidal pyridines," *New Journal of Chemistry*, vol. 42, no. 1, pp. 184–197, 2018, doi: 10.1039/c7nj03742b.

[27] B. Daigle and S. Decarlo, "Office of Industries Magnesium Price Spike: A Flash in the Pan?," 2021. Accessed: Oct. 26, 2025. [Online]. Available: https://www.usitc.gov/publications/332/working_papers/magnesium_wp_compliant_.pdf

[28] H. I. Lee *et al.*, "The Structural Effect of Electrode Mesh on Hydrogen Evolution Reaction Performance for Alkaline Water Electrolysis," *Front Chem*, vol. 9, Nov. 2021, doi: 10.3389/fchem.2021.787787.

Material suplementario

a)  b) 

Figura S1. Proceso de extracción de sal del agua de mar. a) Pila de cristalización usada en la producción de sal cruda; b) Recipiente metálico con agua de mar sobre un horno de barro usado en la producción de sal cocinada. Fotografías por autora tomadas en Colorado de Abangares en la finca Bernio Garay del día 10/02/2022.

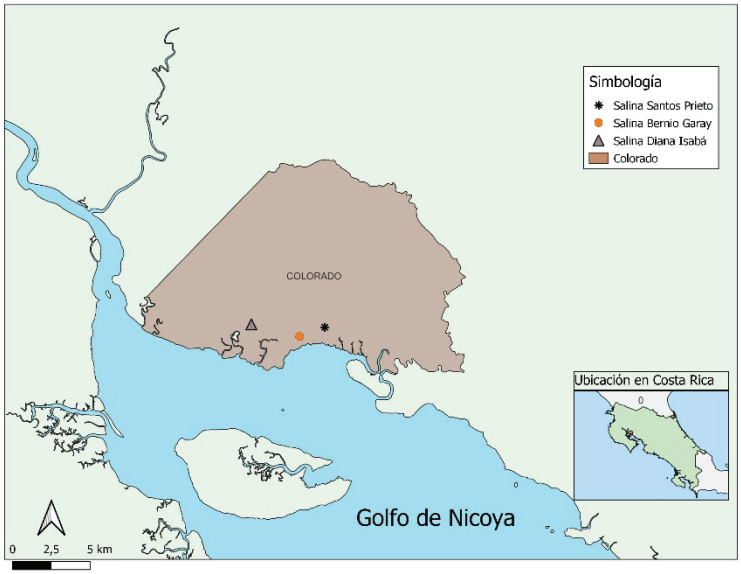


Figura S2. Región de Abangares en el Golfo de Nicoya con los puntos de muestreo de las salinas. Fuente: Modificación del mapa de la región de muestreo en Colorado de Abangares realizado por Ana Cristina Brenes Granados y Rafael Bonilla Mata.



Figura S3. Configuración del sistema de electrólisis para la precipitación de calcio, magnesio y litio a partir de salmueras.

Estimación del área de los electrodos

Para la determinación de la densidad de corriente se realiza un cálculo del área superficial del electrodo considerando la geometría del electrodo según la información presente en el Cuadro 1 y el procedimiento descrito en el artículo de Lee y colaboradores [28] para el cálculo de las unidades por área, segmentos independientes y de unión del electrodo.

Cuadro 1. Características del electrodo separado de Pt/Ir 04/1 utilizado en la electrólisis.

30 mm	Diámetro del electrodo
15 mm	Radio del electrodo
40 mm	Altura del electrodo
0,120 mm	Diámetro del alambre
0,5 mm	Ancho medio de poro

Datos obtenidos de la ficha técnica del fabricante de los electrodos, marca Heraeus.

Para esto se definió primero una unidad de malla, así la longitud de una unidad de malla está compuesta por 2 alambres y un poro, es decir 2 veces el diámetro del alambre y el ancho del poro. Luego se realizó el cálculo del área cilíndrica del electrodo para establecer una relación entre el área de las unidades de malla y el área total y de esta manera calcular el número total de unidades de malla en el electrodo.

Cálculo del área de un electrodo cilíndrico

$$A_{cilindro} = 2\pi rh$$

$$A_{electrodo} = 2 \cdot \pi \cdot 15\ mm \cdot 40\ mm$$

$$A_{electrodo} = 3{,}8 \cdot 10^3\ mm^2$$

Según el artículo de Lee [28] se puede realizar el cálculo de área con las siguientes fórmulas:

$$Área\ del\ segmento\ independiente = \pi \cdot \frac{1}{2} \cdot s \cdot w$$

$$Área\ del\ segmento\ de\ unión = \pi \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot s^2 = \frac{3\pi}{8} \cdot s^2$$

Donde:

s= ancho del alambre

w= ancho medio de poro

Luego se multiplicó el área de cada sección independiente y de segmento de unión por el número de segmentos correspondientes. Para el cálculo de la cantidad de segmentos se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$Segmentos\ independientes = 2 * n * (n + 1)$$

$$Segmentos\ de\ unión = (n + 1)^2$$

Donde n= número de poros, contados a lo largo y a lo ancho como una única unidad

Finalmente, estos valores se multiplicaron por las unidades totales de poro para obtener el valor del área total del electrodo de malla. Las unidades de malla totales se relacionan de manera cuadrática con el número total de poros.

Cálculo del consumo energético

Se tiene la aplicación de 5 A por 4 horas a una tensión constante de 7 V, se obtiene el consumo energético:

Este valor transformado a kW*h corresponde a:

Luego para un consumo de energía menor a 3000 kWh se tiene una tarifa de 70,83 colones por cada kWh, esto quiere decir que el costo de producción para este consumo es de 10 colones.

Cálculo de masa de magnesio:

$$Masa\ de\ magnesio = V_{salmuera} * Concentración\ magnesio_{salmuera}$$

$$Masa\ de\ magnesio = 0{,}8\ L * 46629 mg/L$$

$$Masa\ de\ magnesio = 37303\ mg$$

$$Masa\ de\ magnesio = 37{,}30\ g$$

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Uso de estadísticos T^2 de Hotelling para detectar problemas de densidad en una espuma metálica

Use of Hotelling's T^2 Statistics to Detect Density Issues in a Metal Foam

Paula Solano-Leandro[1], Valeria Mayorga-Cervantes[2], Marcela Meneses-Guzmán[3], Bruno Chiné-Polito[4]

Fecha de recepción: 31 de mayo, 2025
Fecha de aprobación: 22 de septiembre, 2025

Solano-Leandro, P; Mayorga-Cervantes, V; Meneses-Guzmán, M; Chiné-Polito, B. Uso de estadísticos T^2 de Hotelling para detectar problemas de densidad en una espuma metálica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 1. Enero-Marzo, 2026. Pág. 91-103.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i1.8018

1 Escuela de Ingeniería en Producción Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
pasolano@itcr.ac.cr
https://orcid.org/0009-0001-9178-196X
2 Ingeniera en Producción Industrial. Trabajadora independiente. Costa Rica.
valemayorgac@gmail.com
https://orcid.org/0009-0000-6337-3670
3 Escuela de Ingeniería en Producción Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
mameneses@tec.ac.cr
https://orcid.org/0000-0001-5922-0145
4 Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
bchine@tec.ac.cr
https://orcid.org/0000-0001-6966-5973

Palabras clave

Espuma metálica; perfiles de densidad; estadístico de Hotelling; detección de defectos.

Resumen

La estructura interna de una espuma metálica se puede investigar mediante la medición de perfiles de densidad, por ejemplo, usando técnicas de medición no-destructivas, escaneando el material a lo largo de su espesor o a través de alguna dirección representativa. En este estudio se analizan los perfiles de intensidad de la radiación gamma absorbida por una espuma fabricada con una aleación AlSi10. Si los perfiles se caracterizan mediante indicadores de forma del perfil, que reflejan el estado de control de la densidad del material, es posible diseñar un gráfico T^2 de Hotelling para Fase I, identificando cambios en la media de dichos indicadores a lo largo del espacio. La propuesta se basa en observar varios valores del estadístico por arriba del límite establecido y en forma consecutiva, porque estos pueden detectar variaciones de densidad en una zona específica del material. Se ha comprobado que la tasa de falsas alarmas de esta propuesta es muy baja, por lo que se permite planificar su implementación para monitorear posibles defectos internos. Además, proporciona un método para evaluar la uniformidad de la densidad, sin necesidad de recurrir a métodos de control destructivos.

Keywords

Metal foam; density profiles; Hotelling's statistics; defects detection.

Abstract

The internal structure of a metal foam can be investigated by measuring density profiles, using no destructive testing which scans the material across its thickness or along some representative direction. In this study we analyse the profiles of gamma radiation intensity, absorbed by a metal foam manufactured with a AlSi10 alloy. If these profiles are characterized using shape indicators reflecting the state of density control of the material, it is possible to design a Phase I Hotelling's chart to identify changes in the mean of these indicators across the space. The approach is based on observing several statistic values consecutively exceeding the established limit, as these may detect density changes within a specific area of the material. It has been verified that the false alarm rate of this approach is very low, which enables the planning of its implementation for monitoring potential internal defects. Furthermore, it provides a method for assessing density uniformity without the need for destructive testing methods.

Introducción

El Control Estadístico de Procesos (SPC, por su sigla en inglés) proporciona un conjunto de métodos y herramientas accesibles que permiten mejorar el desempeño de un determinado proceso, reduciendo la variabilidad y evaluando su capacidad para cumplir con las especificaciones de un producto. Entre las herramientas más relevantes del SPC se encuentran los gráficos de control estadístico, tanto univariados como multivariados, cuyo propósito es monitorear el proceso y detectar desviaciones [1]. Un gráfico de control se construye a partir de información obtenida de una muestra recolectada mientras el proceso opera bajo condiciones de control estadístico. Al estar diseñado con la variabilidad natural del proceso, cualquier cambio estadísticamente significativo se manifestará como una alteración en los parámetros

representados en el gráfico. Esta etapa de diseño de gráficos de control se denomina Fase I. Posteriormente, la Fase II, de monitoreo u operativa, utiliza los límites de control establecidos durante la Fase I para detectar y actuar sobre causas especiales de variación [1].

Cuando se abordan problemas caracterizados por múltiples parámetros, es recomendable emplear gráficos de control multivariados, pues los gráficos univariados —que consideran una sola variable a la vez— tienden a incrementar la probabilidad de generar falsas alarmas debido a causas especiales de variación [2,3]. Entre los gráficos multivariados más utilizados en la literatura se encuentra el gráfico de Hotelling, diseñado para detectar cambios en la media de variables interrelacionadas. Este gráfico representa una extensión multivariada del gráfico de control de Shewhart y permite la supervisión simultánea de múltiples variables que describen un proceso o la calidad de un producto [3].

Las espumas metálicas son materiales celulares de celdas cerradas, constituidas por una red de espacios vacíos (poros grandes) delimitados mediante paredes solidas interconectadas y caracterizadas por bajos valores de densidad [4,5]. Lo anterior, combinado con las propiedades mecánicas, térmicas, etc. del metal base [6,7], permite su aplicación funcional en absorción de energía, aislamiento térmico y acústico, amortiguamiento de vibraciones, así como para usos estructurales en sectores como el automotriz, naval y biomédico [8]. No obstante, su adopción comercial ha sido limitada debido a factores relacionados con variaciones en su estructura, métodos de fabricación y costos de producción [9,10].

La manufactura de una espuma debe asegurar que el material mantenga una porosidad controlada en cantidad, tamaño y distribución, garantizando una estructura homogénea de la matriz del material [7,9]. Estos objetivos son difíciles de alcanzar, especialmente en el caso de una espuma de aluminio cuando su producción es por vía metalúrgica en moldes y usando agentes espumantes. La coexistencia de fases metálicas sólida, líquida y de burbujas gaseosas genera fenómenos complejos que dificultan el control del proceso [8,11]. Como resultado, se obtienen materiales no homogéneos, con gradientes de densidad, variaciones en el tamaño de celdas y presencia de defectos [11,12]. Estos factores, en conjunto con el desarrollo constante de nuevos materiales, hace que este campo sea relevante y desafiante [11, 13]. En particular, la densidad se relaciona con las propiedades mecánicas del material, como son la resistencia a tracción, compresión o torsión [10, 14–16]. En efecto el perfil de densidad, medido a lo largo un espesor o de una longitud de una muestra de material celular, puede proporcionar información sobre su uniformidad estructural [17-19]. También en el caso de materiales compuestos, como los paneles de viruta de madera, los parámetros de proceso afectan significativamente la forma del perfil de densidad [20,21,22]. En [23] se ha estudiado la relación entre el perfil de densidad vertical en tableros de viruta de madera y su desempeño funcional, demostrando que la forma del perfil influye directamente en el rendimiento del producto final.

El objetivo de este trabajo es proponer un procedimiento de monitoreo estadístico en la Fase I para el control de una espuma de aluminio. La propuesta contempla la utilización de técnicas de medición no destructivas (NDT, por su sigla en inglés), para analizar la densidad de la espuma mediante perfiles experimentales de esta magnitud a lo largo del material. A partir de los perfiles se calculan los indicadores de la forma del perfil y posteriormente se determinan los estadísticos. Debido a la naturaleza de las espumas metálicas producidas por vía metalúrgica, es común observar heterogeneidad en su densidad, ocasionando que algunos valores del estadístico excedan los límites de control del gráfico de manera aislada. Si embargo, la presencia de estos valores aislados no implica necesariamente que el proceso esté fuera de control. Por lo tanto, se propone una interpretación de los valores consecutivos de los estadísticos que exceden los límites de control, para evaluar la uniformidad de la densidad de las espumas, en la zona involucrada.

La metodología empleada en este trabajo se describe en las secciones siguientes. Se brinda el método de medición y la estrategia para obtener los conjuntos de perfiles de densidad, así como el modo para determinar los indicadores del perfil. Sucesivamente, se introduce la técnica para la reducción de indicadores, para cada conjunto de perfiles, seleccionando aquellos que serán empleados en el diseño del gráfico de control. Posteriormente, se presenta el enfoque para evaluar el desempeño del gráfico, así como una propuesta de interpretación de los valores estadísticos consecutivos que exceden el límite superior de control. Finalmente, se presentan las conclusiones y las recomendaciones finales.

Metodología

Los perfiles de densidad se obtuvieron a partir de mediciones de la intensidad de radiación absorbida por el material, utilizando un sistema de escaneo por rayos gamma [24]. Las mediciones se desarrollaron en una muestra de espuma de aluminio con dimensiones de 16.5 × 16.5 × 4.0 cm^3, fabricada mediante el proceso de espumado a partir de precursores comerciales Alulight® GmbH. Los precursores consistían en una aleación AlSi10 mezclada con hidruro de titanio (TiH_2), al 0.80 % en peso, como agente espumante. Durante la fabricación, las varillas precursoras se colocaron sobre el plano X–Y perpendicular a la dirección de la gravedad, como en Figura 1. En la misma figura se brindan los ejes de referencia X, Y, Z, la muestra de la espuma y las siguientes configuraciones para la medición de la densidad: Canto X, rayos paralelos al eje Y, donde, para una determinada coordenada X, las mediciones son en correspondencia de distintos valores Z; Canto Y, rayos paralelos al eje X, donde, para una determinada coordenada Y, las mediciones son en correspondencia de distintos valores Z; Frente X, rayos paralelos al eje Z donde, para una determinada coordenada X, las mediciones son en correspondencia de distintos valores Y; Frente Y, rayos paralelos al eje Z donde, para una determinada coordenada Y, las mediciones son en correspondencia de distintos valores X. Para cada posición del escaneo, se registraron tres mediciones con un tiempo de muestreo de 30 segundos por medición. Cada perfil de Canto se formó a partir de 18 mediciones, espaciadas cada 2 mm entre 0 mm y 34 mm y cada perfil de Frente se construyó con 82 mediciones, separadas cada 2 mm, desde 0 mm hasta 162 mm. En total, se registraron 39 perfiles para cada uno de los Cantos y de los Frentes.

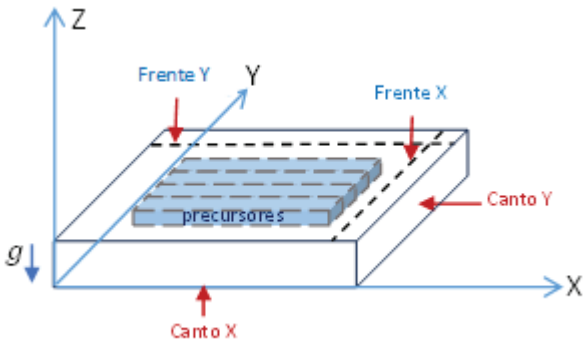


Figura 1. Sistema de referencia y posicionamiento de los precursores en la muestra de la espuma metálica.

Sucesivamente se implementó el método para caracterizar la densidad de la espuma, procesando directamente los valores medidos, pues la intensidad de radiación gamma absorbida es proporcional a esta propiedad. En el trabajo se usó el método de Wong et al. [20], desarrollado para evaluar la calidad de tableros de partículas de madera. Los autores asumieron como variable de respuesta el perfil de densidad a lo largo del espesor del tablero,

caracterizando su forma mediante varios parámetros. El mismo método se implementó para la densidad de la espuma metálica, usando los 14 indicadores señalados en la Figura 2. En la figura, la densidad máxima (PD) se definió como el promedio entre la densidad máxima medida en la mitad izquierda del perfil, correspondiente a la base (PDb), y la densidad máxima en la mitad derecha, correspondiente a la superficie (PDs). La posición central del perfil, próxima a X = 80 mm, dividió el intervalo de medición en dos mitades. Por su parte, la densidad del núcleo (CD) se calculó como la media de la densidad en la sección central que abarca el 20 % de las posiciones alrededor del punto medio del perfil. La densidad media (MD) correspondió al promedio de todas las mediciones de densidad a lo largo del perfil. El factor de gradiente (GF) se definió como la distancia horizontal entre la línea central (CL) y el contorno del perfil, medida a una altura equivalente a la mitad de la diferencia entre la densidad máxima (PD) y la densidad del núcleo (CD). Este factor se calculó para ambos lados del perfil: hacia la base (GFb) y hacia la superficie (GFs). El área de pico (PA) correspondió al área bajo la curva del perfil que superaba la línea de la densidad media (MD), calculada también de forma separada para la base (PAb) y la superficie (PAs). Las distancias de pico (Pbb y Pbs) indicaron la distancia desde los extremos del perfil (base o superficie) hasta el punto donde el perfil intersecaba la línea de MD. Finalmente, se propuso el rango (R) como un indicador adicional, definido como la diferencia entre los valores máximo y mínimo de densidad en todo el perfil.

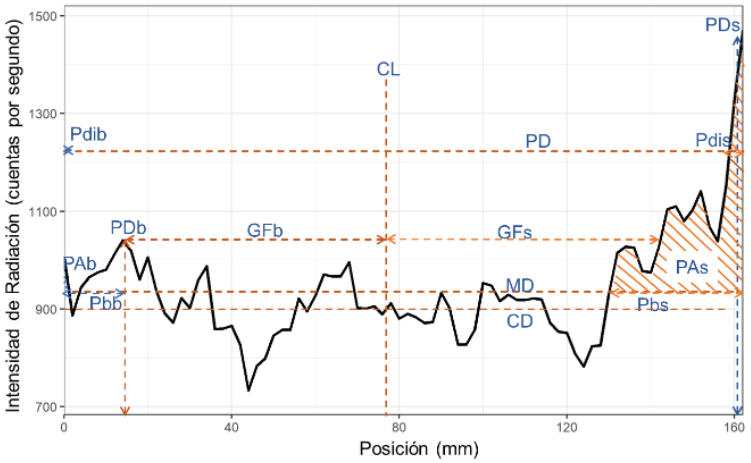


Figura 2. Indicadores que caracterizan a un perfil de densidad de espuma metálica.

Para desarrollar el método, se programó una rutina en lenguaje R para extraer los 14 indicadores, a partir de cada perfil de densidad. Esto generó un conjunto de 14 variables para cada uno de los 39 perfiles, tanto de Frentes como de Cantos. Se aplicó la técnica de Análisis Factorial a cada conjunto de datos, con el objetivo de reducir la dimensionalidad e identificar un subconjunto de indicadores que explicara la mayor parte de la varianza total. Con los indicadores seleccionados, se diseñó un gráfico de control multivariado utilizando el estadístico T^2 de Hotelling [3], el cual se calculó mediante la ecuación (1).

$$T^2 = (\boldsymbol{x} - \bar{\boldsymbol{x}})' \boldsymbol{S}^{-1} (\boldsymbol{x} - \bar{\boldsymbol{x}}) \qquad (1)$$

donde $\bar{\boldsymbol{x}} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \ldots, \bar{x}_p]'$ representa el vector de medias muestrales de los indicadores que caracterizan los perfiles, $\boldsymbol{x}$ es el vector de variables que caracterizan a cada perfil y $\boldsymbol{S}$ la matriz de varianza-covarianza muestral de las pxp variables. Así, el valor de un estadístico T^2 de Hotelling cuantifica la distancia multivariada entre un vector de observaciones y la media multivariada del proceso, ponderada por la variabilidad y correlación entre variables. Cuanto

mayor es su valor, mayor es la discrepancia con respecto al comportamiento esperado, mientras que valores pequeños indican similitud con los valores de referencia. Los límites de control superior (UCL) e inferior (LSC) para controlar los estadísticos, para Fase I, son:

$$UCL = \frac{(m-1)^2}{m}\beta_{\alpha,p/2,(m-p-1)/2} \qquad (2)$$

$$LSC = 0$$

donde $\beta_{\alpha,p/2,(m-p-1)/2}$ es la cola superior de la distribución beta con parámetros $p/2,(m-p-1)/2$.

Se utilizó la función *mqcc* de R, para determinar los límites de control a partir de los perfiles originales, estableciendo un error tipo I, α, como valor individual. Dado que se realizaron pruebas simultáneas, para la interpretación se debió tomar en cuenta el error de la familia, calculado como: $\alpha_{familia} = (1-\alpha)^p$ donde p es el número de variables. Con el fin de evaluar el desempeño del gráfico de control en términos del ARL_0 de diseño correspondiente a 1/ α, se implementó una función *"boostrapping"* para generar nuevos perfiles a partir de los originales. En este caso se tomaron 2 perfiles al azar y se promediaron sus valores para cada posición, generando así N nuevos perfiles en cada iteración. El procedimiento se aplicó por separado a los conjuntos de perfiles correspondientes a Canto X, Canto Y, Frente X y Frente Y. Para cada nuevo perfil, se calcularon los indicadores seleccionados y su correspondiente estadístico T^2 mediante la Ecuación 1. Se identificó si dicho estadístico superaba el límite superior de control y se registró el "*run length*" o número de muestras necesarias para que el gráfico detecte un fuera de control. Este se promedió para determinar el *ARL* de las 1000 iteraciones ejecutadas. Sucesivamente, se realizaron corridas para diferentes valores de α, así comparando el desempeño del gráfico. Cualquier cambio en el proceso —reflejado en la media o la correlación entre indicadores— se manifestaría como un cambio en el valor del estadístico T^2, permitiendo su detección cuando se compare con el límite previamente establecido. Como la estructura interna de las espumas no es homogénea, es esperable que mediante el estadístico T^2 se muestre saltuariamente un fuera de control, como punto aislado. En cambio, la aparición de varios estadísticos T^2 consecutivos fuera del límite de control indicaría que los perfiles de una zona específica de la espuma metálica puedan evidenciar un cambio consistente en su forma, señalando posibles defectos internos o irregularidades en la uniformidad de la densidad del material.

Resultados y discusión

En la Figura 3 se brindan los perfiles experimentales de Canto X y Canto Y, observando una densidad mayor en las posiciones extremas respecto de las posiciones más centrales. Este comportamiento se relaciona con el enfriamiento y solidificación prematura de la espuma cercana de las paredes del molde, que provoca en esa región una expansión reducida de las burbujas. La Figura 4 muestra los perfiles de Frente, donde se aprecia que los de Frente X presentan una mayor irregularidad en las mediciones, en comparación con los de Frente Y. Esto podría indicar que los precursores, dispuestos perpendicularmente al eje Y, entrando en contacto entre sí durante la expansión, generan un patrón no homogéneo de burbujas, reflejado en variaciones locales de la densidad.

Para estos perfiles se evalúa la reducción de dimensionalidad mediante Análisis Factorial en los cuatro conjuntos (Canto X, Canto Y, Frente X y Frente Y), identificándose que el 80 % de la variabilidad total se explica principalmente por los 4 indicadores Rango, PD, CD y MD.

Utilizando la Ecuación 2 con p = 4 indicadores, se establece el límite de control superior, cuyos valores son 15.19949, 13.7690546 y 11.70098 para los α alternativos de 0.0010, 0.0027 y 0.0100, respectivamente.

Aunque el tamaño de muestra no altera la estructura de la matriz de varianza-covarianza, sí influye en la estabilidad de sus estimaciones. Con pocas observaciones, la matriz puede ser inestable o sesgada, mientras que un mayor número de muestras permite una mejor aproximación a la covarianza poblacional. Por ello, se emplea N=200, una cantidad mayor de muestras en comparación con la cantidad original de 39 perfiles.

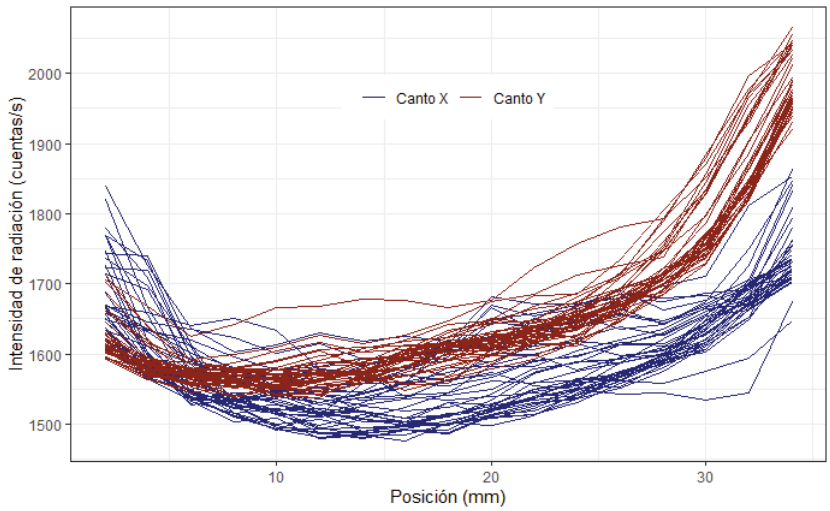


Figura 3. Perfiles de la radiación absorbida de Canto X y Canto Y de la espuma metálica.

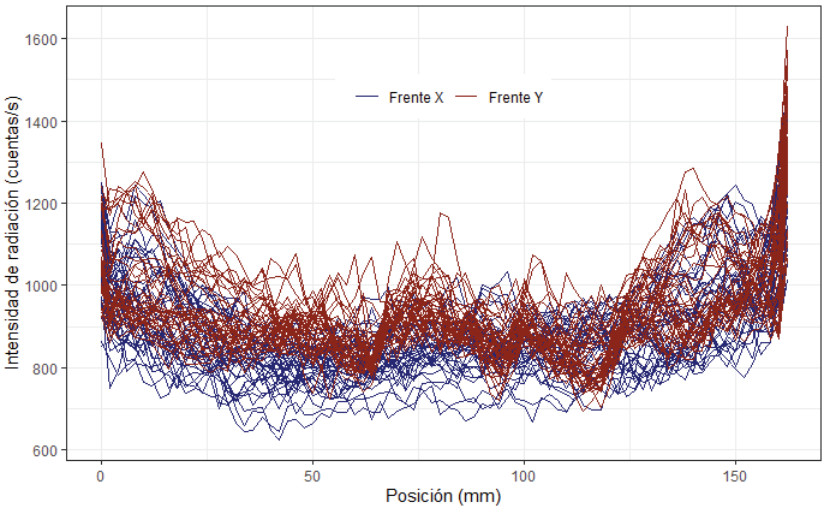


Figura 4. Perfiles de la radiación absorbida de Frente X y Frente Y de la espuma metálica.

En el Cuadro 1 se brinda el resultado del ARL para cada conjunto de mediciones, en correspondencia de tres valores de α. Para todos los casos, el ARL mayor se obtiene para las mediciones de Canto X, mientras el menor para el Frente Y, con valores que van desde 120 hasta 192. Se observa que, aunque la diferencia entre los errores α sea considerable, los resultados de los ARL estimados no lo son, siendo respectivamente de 36, 33 y 27, para

el Canto X. Si se comparan estos resultados con el valor teórico del ARL, se aprecia que en promedio el ARL del gráfico es más bajo, pero esta diferencia se reduce considerablemente si se confronta con el ARL de la tasa de error de familia (FWER) de 1- $(1-\alpha)^p$.

El estadístico T^2 de Hotelling mide la distancia multivariada entre vectores de medias de los indicadores de los perfiles, ponderada por la variabilidad y correlación entre variables. Por tanto, la presencia de varios valores T^2 consecutivos fuera de control indica un cambio en la densidad del material en esa zona. Valores altos del estadístico reflejan una mayor diferencia respecto a la media esperada, mientras que valores bajos sugieren que no hay diferencias significativas.

Cuadro 1. Resultados del ARL para los tres valores de α individual.

α	0.00100	Mínimo y máximo	0.00270	Mínimo y máximo	0.01000	Mínimo y máximo
UCL	15.19949		13.7690546		11.70098	
ARL Canto X	36	Min=1 Max=191	33	Min=1 Max=185	27	Min=1 Max=185
ARL Canto Y	26	Min=1 Max=182	22	Min=1 Max=185	19	Min=1 Max=153
ARL Frente X	29	Min=1 Max=175	24	Min=1 Max=192	18	Min=1 Max=120
ARL Frente Y	26	Min=1 Max=182	23	Min=1 Max=185	18	Min=1 Max=153
ARL FWER	250		93		25	

En el Cuadro 2 se aprecia que, para las mediciones del Canto X, de las 1000 iteraciones se encuentran 118 con secuencias de al menos dos estadísticos T^2 de Hotelling consecutivos; de estas, 111 iteraciones tienen solo una secuencia, 6 iteraciones dos secuencias y 1 iteración presenta tres secuencias. La secuencia más larga encontrada contiene solo 3 valores del estadístico, uno más del valor establecido de 2.

De acuerdo con los resultados de los Cuadros 2, 3 y 4, las iteraciones que encuentran una secuencia son más del 80%, mientras que un porcentaje menor se debe a 2 secuencias y aun menos a 2 secuencias.

Cuadro 2. Cantidad de secuencias formadas por dos estadísticos T^2 consecutivos encontradas en cada iteración.

α= 0.001	Iteraciones con secuencias	Cantidad de secuencias	Cantidad de iteraciones		Longitud más larga
Canto X	118	1	111	94%	3
		2	6	5%	
		3	1	1%	
		4	0	0%	
Canto Y	251	1	218	87%	3
		2	28	11%	
		3	4	2%	
		4	1	0%	

α= 0.001	Iteraciones con secuencias	Cantidad de secuencias	Cantidad de iteraciones		Longitud más larga
Frente X	217	1	191	88%	3
		2	26	12%	
		3	0	0%	
		4	0	0%	
Frente Y	234	1	207	88%	3
		2	26	11%	
		3	1	0%	
		4	0	0%	

Cuadro 3. Cantidad de secuencias formadas por mínimo dos estadísticos T^2 consecutivos encontradas en cada iteración.

α=0.0027	Iteraciones con secuencias	Cantidad de secuencias	Cantidad de iteraciones		Longitud más larga
Canto X	130	1	121	93%	3
		2	8	6%	
		3	1	1%	
		4	0	0%	
Canto Y	313	1	265	85%	3
		2	243	78%	
		3	4	1%	
		4	1	0%	
Frente X	303	1	256	84%	3
		2	46	15%	
		3	1	0%	
		4	0	0%	
Frente Y	304	1	254	84%	3
		2	47	15%	
		3	3	1%	
		4	0	0%	

Cuadro 4. Cantidad de secuencias formadas por mínimo dos estadísticos T^2 consecutivos encontradas en cada iteración.

α= 0.01	Iteraciones con secuencias	Cantidad de secuencias	Cantidad de iteraciones		Longitud más larga
Canto X	196	1	179	91%	3
		2	16	8%	
		3	1	1%	
Canto Y	379	1	302	80%	3
		2	63	17%	
		3	13	3%	
		4	1	0,3%	
Frente X	443	1	327	74%	3
		2	103	23%	
		3	11	2%	
		4	1	0,2%	
		5	1	0,2%	
Frente Y	417	1	323	77%	3
		2	77	18%	
		3	16	4%	
		4	1	0%	

La mayor cantidad de secuencias se observan en las mediciones de Frente Y. Por ejemplo, para un α= 0.001, se evidencian secuencias en 234 iteraciones de las 1000; de estas, 207 tienen una secuencia, es decir, la probabilidad en media de observar una secuencia en un perfil es de un 20% aproximadamente. De la misma manera, las probabilidades de observar dos y tres secuencias en un mismo perfil son de 2.6% y 1%, respectivamente.

Para las variaciones locales de densidad al interno de una espuma metálica, los resultados obtenidos pueden sugerir algunas guías para decidir sobre qué parámetros utilizar para su monitoreo. Entre estos se incluyen, el número de perfiles por zona, la distancia entre mediciones dentro de cada perfil, el espaciamiento entre perfiles, el valor del nivel de significancia α, así como la longitud mínima de secuencias de estadísticos T^2.

Las Figuras 5 y 6 brindan ejemplos del comportamiento de los gráficos de Control multivariados T^2 de Hotelling. La Figura 5(a) evidencia una secuencia de 3 valores consecutivos del estadístico, señalando solo una secuencia de tamaño 3, mientras el grafico de Figura 5(b) no señala secuencia, pues ninguna es de tamaño 2 o más grande. La Figura 6(a) muestra una secuencia de dos estadísticos consecutivos y en la Figura 6(b) no se detectan secuencias.

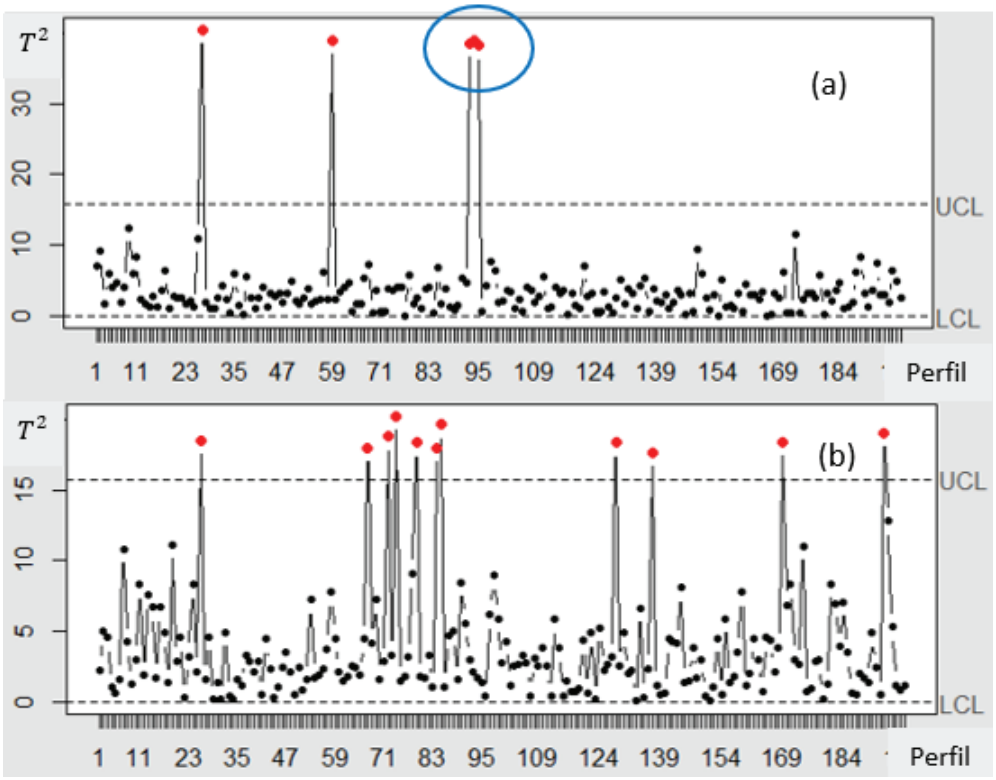


Figura 5. Gráficos T^2 de Hotelling para 1- α = 0.999, mediciones de Canto Y: (a) señala secuencia de 3 estadísticos por arriba del UCL; (b) no señala secuencias.

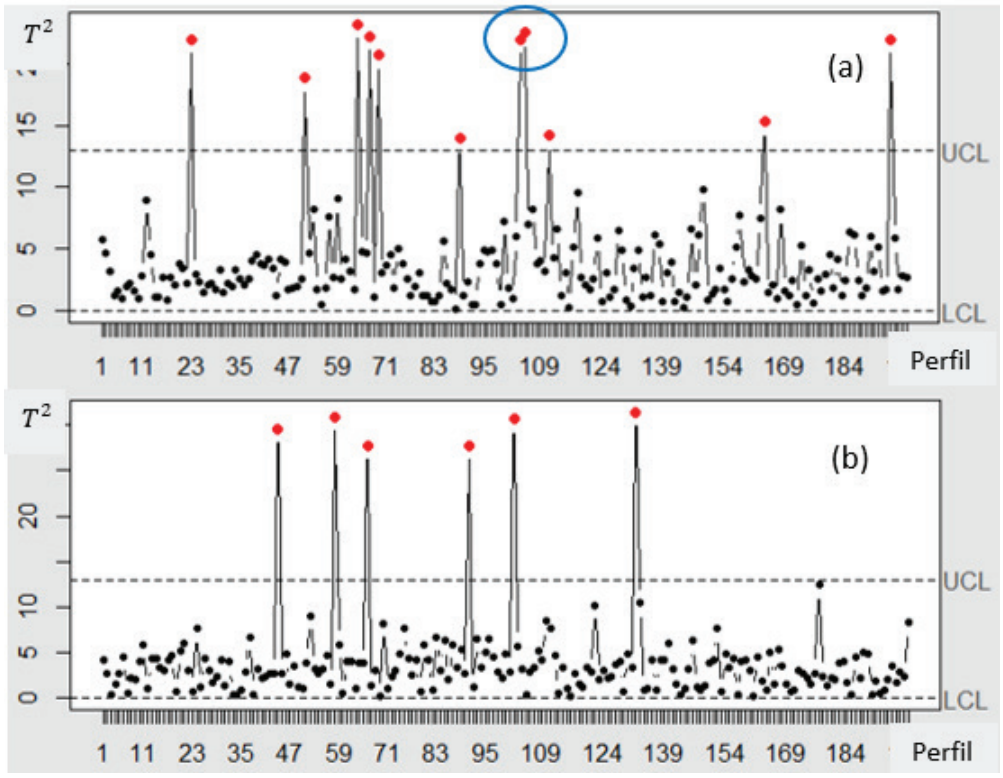


Figura 6. Gráficos T^2 de Hotelling para 1- α =0.99: (a) mediciones de Frente X, que muestran una sola secuencia por encima del UCL; (b) mediciones de Frente Y, que no muestran secuencias.

Conclusiones y recomendaciones

A partir de mediciones de la radiación gamma absorbida por una espuma de aluminio, se ha desarrollado un método de caracterización de su densidad mediante indicadores de forma del perfil, diseñando un gráfico T^2 de Hotelling para Fase I e identificando cambios espaciales en la media de dichos indicadores.

Se ha estimado el ARL del gráfico de control multivariado e identificado secuencias de estadísticos consecutivos que señalan condiciones de fuera de control. La probabilidad de observar secuencias de más de dos estadísticos consecutivos fuera de control ha resultado ser muy baja, indicando que la espuma se ha producido bajo condiciones estables y por tanto en control.

La propuesta de evaluar secuencias de estadísticos consecutivos constituye un enfoque sencillo, pero innovador, que permite detectar posibles fallas internas o irregularidades en la uniformidad de la densidad del material, sin recurrir a métodos destructivos. Para futuras implementaciones, será necesario estimar el número óptimo de estadísticos consecutivos fuera de control que justifique una alerta. Para ello, se recomienda realizar pruebas controladas que incluyan defectos inducidos en el material, lo cual permitirá calibrar adecuadamente los parámetros del sistema de monitoreo. Entre estos parámetros se sugieren, el número de perfiles por zona, la distancia entre mediciones dentro de cada perfil, el espaciamiento entre perfiles, el valor del nivel de significancia α, así como la ya señalada longitud mínima de secuencias de estadísticos T^2 consideradas como señal de posible desviación.

Referencias

[1] W.H. Woodall, D. J. Spitzner, D. Montgomery y S. Gupta, “Using Control Charts to Monitor Process and Product Quality Profiles”, Journal of Quality Technology, vol.36(3), pp.309–320, 2004.

[2] E. Santos-Fernández, “Multivariate Statistical Quality Control Using R”, Springer Science Business Media New York, 2012.

[3] D. Montgomery, Introduction to Statistical Quality Control. 8va ed. Wiley&Sons, USA, 2019.

[4] L.J. Gibson y M.F. Ashby, Cellular solids-structure and properties, 2nd ed., Cambridge University Press, UK, 1997.

[5] A.P. Murali, S. Duraisamy, S. Samuthiram, y R. Vijay “Current and emerging methods for manufacturing of closed pore metal foams and its characteristics: a review”, *Journal of Materials Science,* vol.60, pp. 1187-1227, 2025.

[6] M. Madgule, C.G. Sreenivasa y A.V. Borgaonkar, “Aluminium metal foam production methods, properties and applications - a review”, *Materials Today: Proceedings,* vol.77, pp. 673-679, 2023.

[7] M. Ashby, T. Evans, N. Fleck, L. Gibson, J.W. Hutchinson, H. Wadley, Metal Foams: A Design Guide. 1era ed., Elsevier, USA, 2000.

[8] J. Banhart, “Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams”, Progress in Materials Science. Vol.46, pp.559-632, 2001.

[9] C. Ji, H. Huang, T. Wang y Q. Huang, “Recent advances and future trends in processing methods and characterization technologies of aluminum foam composite structures: A review”, Journal of Manufacturing Processes, vol.93, pp. 116-152, 2023.

[10] S.U. Nisa, S. Pandey, P.M. Pandey, “A review of the compressive properties of closed-cell aluminum metal foams”, Journal of Process Mechanical Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E, vol.237(2), pp.531-545, 2023.

[11] E. Solorzano, M.A. Rodriguez-Perez, J.A. Reglero y J.A. De Saja, “Density gradients in aluminum foams: characterization by computed tomography and measurements of the effective thermal conductivity”, Journal of Materials Science vol.42, pp. 2557-2564, 2007.

[12] P.E. Sarzosa Viera, E.P Abarca Pérez & E.V Sailema Sailema, “Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas”. Tesla Revista Científica, vol.2(2), 2022.

[13] C. Körner, R.F. Singer, “Processing of metal foams—challenges and opportunities”. Advanced Engineering Materials vol.4, pp.159-165, 2000.

[14] Y. Sugimura, H. Meyer, H.Y. He, H. Bart-Smith, J. Grensted, A.G. Evans. “On the mechanical performance of closed cell Al alloy foams”, Acta Materialia; vol.45, pp.5245–5259, 1997.

[15] Y. Sugimura, A. Rabiei, A.G. Evans, A.M. Harte, N.A. Fleck, “Compression fatigue of a cellular Al alloy”, Materials Science and Engineering, vol.269, pp.38–48, 1999.

[16] C. Körner, F. Berger, M. Arnold, C. Stadelmann, R.F. Singer, “Influence of processing conditions on morphology of metal foams produced from metal powder”, Materials Science and Technology, vol.16, pp.781-784, 2000.

[17] A. Sanabria-Castro, M. Meneses-Guzmán, B. Chiné-Polito, “Uso de regresión de soporte vectorial para el control de espuma metálica”, Revista Tecnología en Marcha, vol.42, 2023.

[18] M. Meneses-Guzmán, B. Chiné, M. Conejo-Solís & V. Mussi, “Caracterización y Monitoreo del perfil de densidad de una espuma metálica”, 13º Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica, 13º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Lisboa, Portugal, 23-26 de Outubro, 2017.

[19] A. Robelo-Latorraca, M. Meneses-Guzmán and B. Chiné-Polito, “Monitoreo de perfiles de la intensidad de radiación absorbida por una espuma metálica”, XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, 2023.

[20] E. D. Wong, M. Zhang, Q. Wang & S. Kawai,” Effects of mat moisture content and press closing speed on the formation of density profile and properties of particleboard”, Journal of Wood Science, vol.44, pp.287-295, 1998.

[21] T. Young, P. Winistorfer, S. Wang, “Multivariate Control Charts of MDF and OSB vertical density profile attributes”, Forest Products Journal, vol.49(5), pp.79-86, 1999.

[22] B.M. Colosimo, S. Doriguzzi, M. Meneses & Q. Semeraro. “Functional Data Modeling and Monitoring applied to Particleboard Manufacturing”, International Conference on Applied Stochastic Models and Data Analysis, Rome, Italy, 2011.

[23] B.M. Colosimo, M. Meneses, & Q. Semeraro, “On the effectiveness of profile monitoring to enhance functional performance of particleboards”. Quality and Reliability Engineering International, vol.31(8), pp.1665-1674, 2015.

[24] F. Rodriguez-Mendez, M. Meneses-Guzman, B. Chiné-Polito, R. Pereira-Arroyo, “Desarrollo de un sistema automatizado de escaneo por radiación gamma”. Revista Tecnología en Marcha, vol.32(3), pp.87-98, 2019.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Determinación de caudal ambiental para diferentes condiciones: una trayectoria de estudios de caso en Costa Rica

Environmental flow assessment under variable conditions: a series of case studies from Costa Rica

Laura Chavarría-Pizarro[1], Isabel Guzmán-Arias[2], Francisco Quesada-Alvarado[3], Valeria Serrano-Núñez[4], Fernando Watson-Hernández[5]

Fecha de recepción: 10 de junio, 2025
Fecha de aprobación: 29 de septiembre, 2025

Chavarría-Pizarro, L; Guzmán-Arias, I; Quesada-Alvarado, F; Serrano-Núñez, V; Watson-Hernández, F. Determinación de caudal ambiental para diferentes condiciones: una trayectoria de estudios de caso en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 1. Enero-Marzo, 2026. Pág. 104-115.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i1.8047

1 Escuela de Biología. Centro de Investigación en Biotecnología del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
laura.chavarria@itcr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0002-7630-1104
2 Escuela de Ingeniería Agrícola. Centro de Investigación y Extensión en Tecnología e Ingeniería Agrícola (CETIA) del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
iguzman@itcr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0002-5553-3977
3 Universidad Nacional. Costa Rica. f
ranqal@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-9025-3009
4 Escuela de Ingeniería Agrícola. Centro de Investigación y Extensión en Tecnología e Ingeniería Agrícola (CETIA) del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
vserrano@itcr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0002-3708-9323
5 Escuela de Ingeniería Agrícola. Centro de Investigación y Extensión en Tecnología e Ingeniería Agrícola (CETIA) del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Costa Rica.
fwatson@tec.ac.cr
https://orcid.org/0000-0001-8258-4668

Palabras clave

Ríos; ecosistemas; organismos; aprovechamiento; comunidades.

Resumen

La estimación del caudal ambiental en una fuente de agua superficial se puede determinar mediante diferentes metodologías que modifican su nivel de complejidad según las variables involucradas para su cálculo. Desde el Centro de Investigación y Extensión en Tecnología e Ingeniería Agrícola se han aplicado varias metodologías en las diferentes cuencas del país con la finalidad de aportar un registro de caudal ambiental en secciones de control de importancia estratégica en la gestión del recurso hídrico. Este artículo de revisión busca integrar la información obtenida en los estudios realizados para establecer una base de registros fundamentada científicamente para aplicación por parte de los tomadores de decisión y para futuros estudios de caudal ambiental. Los resultados ya obtenidos, permiten generar algunas conclusiones importantes, por ejemplo, se concluyó que para ríos que presentan una evidente degradación ambiental y poco uso por parte de las comunidades, como fue el caso del río Birrís, la metodología más apropiada es la hidrológica. Para ríos que se atraviesan áreas protegidas, como el caso del río Pejibaye, la metodología hidrobiológica, en casos con impacto de actividades humanas sobre los ecosistemas acuáticos como en el caso del río Pirrís, la metodología que mejor se adaptó fue también hidrobiológica y, finalmente cuando las cuencas cuentan con características complejas y diferentes usos antropogénicos, como es el caso de los ríos Tempisque y Sarapiquí, la metodología más apropiada es la holística. Cada una de ellas seleccionada técnicamente bajo los parámetros requeridos para el cálculo de un régimen de caudal ambiental válido para cada condición.

Keywords

Rivers; ecosystems; organisms; utilization; communities.

Abstract

The estimation of environmental flow in a surface water source can be determined using different methodologies that vary in complexity depending on the variables involved in their calculation. The Center for Research and Extension in Agricultural Technology and Engineering has applied several methodologies in different watersheds across the country to provide a record of environmental flow in control sections of strategic importance for water resource management. This review article seeks to integrate the information obtained from the studies conducted to establish a scientifically based record base for application by decision-makers and for future environmental flow studies. The results obtained allow for some important conclusions. For example, it was concluded that for rivers with evident environmental degradation and little use by communities, as was the case with the Birrís River, the most appropriate methodology is the hydrological one. For rivers that flow through protected areas, such as the Pejibaye River, the hydrobiological methodology was also best suited. In cases where human activities impact aquatic ecosystems, as in the case of the Pirrís River, the methodology that best suited the river was also hydrobiological. Finally, when the basins have complex characteristics and different anthropogenic uses, as is the case of the Tempisque and Sarapiquí rivers, the most appropriate methodology is the holistic one. Each of these methods was technically selected under the parameters required to calculate an environmental flow regime valid for each condition.

Introducción

El caudal ambiental se establece como una asignación del régimen hidrológico natural de un río, para preservar la integridad de los sistemas ecológicos y los diferentes usos antrópicos en la fuente [1]. Actualmente, a nivel mundial, se reconoce la importancia de la determinación de los caudales ambientales para la salud de los ecosistemas y el bienestar humano, lo que ha sido aceptado por muchos países a través de la declaración de Brisbane celebrada en el 2007, en la cual se definió que los caudales ambientales son “la cantidad, periodicidad y calidad del agua que se requiere para sostener los ecosistemas dulceacuícolas, estuarios y el bienestar humano que depende de estos ecosistemas” [2].

Los regímenes de caudales ambientales son utilizados como herramienta para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico ante la problemática generalizada de su uso excesivo y del deterioro de los ecosistemas acuáticos [3]. El acatamiento de la asignación de un caudal ambiental requiere de la participación social, un marco institucional y normativo, así como de políticas claras y efectivas [4]. De lo contrario, la tendencia local y mundial continuaría inclinándose hacia la creciente demanda de agua para usos socio-productivos y el consecuente deterioro de su calidad. Hasta ahora, el escenario del recurso hídrico ha sido acaparado por el crecimiento económico, el deterioro ambiental, la reducción de los caudales por el efecto de fenómenos naturales y de las actividades humanas, así como los aspectos socio políticos y legales en torno al aprovechamiento del agua; lo cual ha desencadenado una serie de conflictos socio ambientales que han generado una presión sobre la demanda de agua, en otra perspectiva, bajo el modelo de desarrollo vigente se ha afectado la salud de los ambientes acuáticos, con los consecuentes impactos en los ecosistemas y en las actividades humanas [5]. El problema también ha sido agravado con el proceso de cambio climático, que además ha dejado en evidencia la situación crítica en la que se encuentran muchos ecosistemas. En este contexto, se han impulsado iniciativas para la determinación del caudal ambiental a nivel mundial y nacional, como lo señala la Guía de selección de metodologías para la estimación del caudal ambiental en Costa Rica [6], la cual proporciona criterios técnicos y metodológicos para seleccionar el enfoque más adecuado según las características de cada cuenca.

Costa Rica es un país cuenta con un capital hídrico estimado en 24 m^3 por persona al año [7]. Esta riqueza en recursos hídricos se atribuye a diversas características particulares del territorio, como su clima, ubicación geográfica, sistema orográfico, cobertura vegetal, entre otros factores [8]. A pesar de esta condición, el aprovechamiento del potencial hídrico es limitado y las acciones orientadas a garantizar un uso sostenible son difíciles de gestionar. Sin embargo, se promueve una cultura creciente de planificación del agua, reforzada por el cumplimiento de compromisos que garanticen la satisfacción de la demanda presente y futura de todos los usuarios incluyendo a los ecosistemas.

En Costa Rica, la determinación del caudal ambiental se estableció a partir de 1991, bajo un enfoque porcentual del caudal aforado en la fuente de agua. Este porcentaje, destinado a garantizar la funcionalidad de los ecosistemas acuáticos, ha variado de acuerdo con los usos presentes en cada cuenca; oscilando entre un 10% y un 20% del caudal medio del río [6]. Este porcentaje ha sido cuestionado, debido al aumento de la población, variedad de actividades productivas, cambios en la dinámica de las fuentes de agua, toda vez que, en muchos casos, no ha sido suficiente para preservar el nivel de agua apropiado. Esto ha empezado a cambiar desde el año 2021, cuando el Ministerio de Ambiente y Energía por medio del Decreto Ejecutivo N° 43242-MINAE reglamentó la determinación del caudal ambiental en el país. Documento que surge de un proceso participativo dirigido por la Dirección de Agua del MINAE y en donde el Instituto Tecnológico de Costa Rica, por parte de las escuelas y centros de investigación de Ingeniería Agrícola y Biología tuvieron una participación destacada.

Existen varias metodologías para el cálculo del caudal ambiental, sin embargo, la determinación de la metodología adecuada para cada cuenca dependerá de las características particulares en cada caso y los registros de información hidrometeorológica con que se cuenten. A pesar de que las metodologías de estimación de caudales ambientales son variadas en general se fundamentan en: métodos hidrológicos, hidrobiológicos, hidráulicos, eco-hidráulicos y holísticos [9], [10]. Estos métodos y sus variaciones, aunados a las características particulares de las cuencas de Costa Rica, hace necesaria la implementación de metodologías que se adapten a las diferentes condiciones y que a su vez permitan mantener la funcionalidad de los ecosistemas acuáticos y del recurso para uso de las comunidades. Diferentes instituciones han aplicado algunas metodologías de acuerdo con las necesidades de sus proyectos, especialmente el ICE en el área de producción de energía hidroeléctrica. Por este motivo, el Centro de Investigación y Extensión en Tecnología e Ingeniería Agrícola del TEC estableció la ruta de investigación bajo convenio con la Dirección de Agua del MINAE, con el objetivo de aplicar varias metodologías en la determinación de caudal para puntos estratégicos en cada unidad hidrológica del país. Hasta el momento se han realizado cuatro investigaciones donde se han validado tres metodologías: hidrológica para la subcuenca del río Birrís [11]; hidrobiológica para la subcuenca del río Pejibaye [12] y el río Pirrís; y holística en el río Tempisque [13]. En este artículo se pretende integrar la información obtenida de los cuatro estudios realizados hasta el momento para que sirva como insumo para futuros estudios de caudal ambiental en el país.

Metodología Hidrológica

Los métodos hidrológicos tienen una mayor posibilidad de aplicación por requerir menos cantidad de variables, lo que los convierte en una opción más práctica y económica si se tienen los registros hidrometeorológicos históricos para determinar los caudales deseables, que garantice un nivel de protección de los ecosistemas fluviales [14], dicho registro se recomienda que sea mayor o igual a 20 años. De esta forma se establecen porcentajes de caudal, se determinan índices y se opta por un caudal calificado o establecido antes como normativo, o, se calcula partiendo de recomendaciones previamente establecidas.

Río Birrís

La cuenca del río Birrís pertenece a la cuenca alta del río Reventazón, se encuentra ubicada en la provincia de Cartago y las aguas reciben influencia de los cantones de Oreamuno, Alvarado, Paraíso y Pacayas. La cuenca comprende 83,5 ha e inicia en las faldas del Volcán Irazú (3400 m.s.n.m.) hasta los 100 m.s.n.m. (en la estación de puesto 3 de la empresa Jasec). En esta cuenca se encuentra la planta hidroeléctrica de JASEC la cual toma el agua del río Birrís y Pacayas y cuenta con dos embalses (Puesto I y puesto II). Presenta suelos profundos de origen volcánico clasificados como andisoles. En la parte alta de la cuenca presenta alta densidad de cobertura vegetal y hacia la parte media y baja las tierras se usan más para la agricultura, especialmente pastos y hortalizas [15]. También presenta un evidente deterioro ambiental por las aguas vertidas.

Debido a que la cuenca presentaba una fuerte degradación biótica no se podía tomar en cuenta el componente biológico, por la posible ausencia de especies indicadoras de caudal, como por ejemplo, los géneros *Anacroneuria* (Plecoptera: Perlidae) o *Corydalus* (Megaloptera: Corydalidae). Además, tomando en consideración la alteración de los regímenes de caudal producto de las concesiones otorgadas, se determinó que la metodología más adecuada para el cálculo del caudal óptimo para esta cuenca era la hidrológica, es decir, cuando los ríos presentan una evidente degradación ambiental y poco uso por parte de las comunidades, esta es la metodología que más apropiada para determinar el caudal. En otros países como Irán [16] la combinación de varios modelos hidráulicos fue utilizada para estimar el caudal ambiental en

el caso de un río donde no se contaba con suficientes datos ecológicos. Los investigadores utilizaron los modelos hidrológicos para estimar el caudal en relación con los requerimientos del río.

Książek et al. [17] reconocen que lo métodos hidrológicos por sí solos pueden tener limitaciones en la estimación del caudal debido a la complejidad y heterogeneidad de los cuerpos de agua. Por este motivo, recomiendan el uso de una combinación de métodos hidrológicos e hidráulicos, en su investigación los autores prueban varios modelos y seleccionan los que hacen mejores estimaciones incluso en ríos con alta biodiversidad. En los dos casos mencionados anteriormente, los investigadores utilizaron varios modelos, tanto hidrológicos como hidráulicos (o en combinación) para la estimación del caudal, para compensar la falta de datos biológicos, y hacer una mejor estimación. Sin embargo, debido a que estos modelos en algunas ocasiones tienen limitaciones para integrar otros factores como: geomorfología fluvial, agua subterránea, vegetación riparia y la diversidad de los ecosistemas acuáticos [18]; es recomendable, principalmente en regiones tropicales, y cuando se tengan datos de diversidad utilizar una metodología holística o hidrobiológica, para obtener una estimación de caudal más robusta.

Metodología Hidrobiológica

El método hidrobiológico o método de simulación de hábitat determina el caudal ambiental para ciertas especies indicadoras, y requiere de información hidrológica, hidráulica y biológica [19]. El hábitat físico (velocidad del flujo, profundidad y sustrato) y las preferencias de hábitat de los organismos indicadores se monitorean en campo y se modelan utilizando software de modelación hidráulica en una o dos dimensiones, para diferentes descargas [20]. Debido a que esta metodología incorpora el componente biológico, se decidió utilizarla para determinar el caudal ambiental del río Pejibaye por las características que presenta la cuenca y en el caso del río Pirrís, para determinar el efecto de un proyecto hidroeléctrico en el ecosistema.

Río Pejibaye

La cuenca del río Pejibaye está ubicada en el cantón de Jiménez en la provincia de Cartago, pertenece al sistema de la Cuenca Alta del Río Reventazón ubicada en la vertiente del Caribe de Costa Rica. Cuenta con un área aproximada de 250 km^2 y un rango de altitud que va desde 570 a los 2680 m.s.n.m. Presenta áreas con pendientes mayores a 60%. Asimismo, se caracteriza por tener un promedio anual de precipitación entre los 2800 y 8000 mm, en la zona centro oeste de la cuenca la precipitación puede ser de 9000 mm/año, esto provoca que sea una de las zonas más lluviosas del país, por lo que hace que sea un lugar con gran potencial hidroeléctrico con un caudal promedio anual de 34 m^3/s [21]. Dado que el 80% de la cuenca se encuentra cubierta por bosque denso, debido a que atraviesa el Parque Nacional Tapantí, y por lo tanto es importante para la conservación de especies, es que se decidió que la metodología más apropiada para estimar el caudal era la hidrobiológica. Las comunidades de fauna asociadas a las corrientes están adaptadas a las fluctuaciones naturales en magnitud, frecuencia, y duración de las corrientes de flujo ya sea alto, intermedio o bajo. Además, el caudal afecta a los organismos acuáticos indirectamente al influenciar la composición del sustrato, las propiedades químicas del agua, la disponibilidad de nutrientes, partículas orgánicas y del hábitat [22]. Por ello, los organismos indicadores son muy importantes en la determinación del caudal en los ríos que atraviesan áreas protegidas, ya que, al ser susceptibles a cambios en el ambiente, se debe asegurar un caudal apropiado para mantener el funcionamiento ecológico del ecosistema.

Río Pirrís

El río Pirrís junto con el río Grande de Candelaria, conforman la cuenca del río Parrita, ubicada en la vertiente del Pacífico. Esta cuenca presenta en su parte alta y media una topografía bastante ondulada (2400 y los 3140 m.s.n.m (zona alta), 700–1400 m s.n.m (zona media) y 0–700 m s.n.m (zona baja)) [23]. La precipitación anual varía según la altitud: de 1500 a 3000 mm en la parte alta, de 3000 a 4000 mm en la parte media, y de 4000 a 5000 mm en la parte baja. Dentro del río Pirrís se sitúa el Proyecto Hidroeléctrico Pirrís (P.H. Pirrís) del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) [24]. Debido a que la infraestructura se localiza en el cauce principal del río ésta genera un alto impacto en la fauna dulceacuícola, dado que hay un bloqueo de una quinta parte de la cuenca que se encuentra por encima de los 1080 m.s.n.m y la longitud del tramo crítico [25]. Al ser una obstrucción en un cuerpo de agua se originan impactos biofísicos negativos, como: variación repentina de caudales, cambios morfológicos, aumento de sedimentos en los embalses, disminución o desaparición de biodiversidad acuática y terrestre, eliminación de cobertura boscosa, entre otros [26]. Como en esta cuenca se estimó la afectación del proyecto hidroeléctrico en la biota acuática considerando escenarios de cambio climático, se seleccionó la metodología hidrobiológica. A pesar de que las especies que habitan en los ríos tienen la capacidad física y evolutiva de adaptarse a diversos eventos que ocurren en el medio como lo son las sequías, crecidas estacionales u otros eventos de índole natural; las variaciones repentinas e inconsistentes de grandes volúmenes de agua generan que los ecosistemas acuáticos sufran un máximo impacto, como es el caso de los cambios que provocan los embalses hidroeléctricos [27]. En un escenario crítico como este, es preciso, dentro de la gestión del recurso hídrico, contar con información que resguarde el caudal ambiental de esta y otras cuencas con características similares.

Los modelos hidrobiológicos han sido utilizados de forma exitosa en diferentes estudios. Por ejemplo, Pinna et al. [28] aplicaron la metodología en tres ríos de Italia donde utilizaron modelación del hábitat de macroinvertebrados. Los modelos identificaron con alta precisión y confianza la respuesta de las comunidades de macroinvertebrados a las alteraciones en el flujo y modificaciones de los ríos, demostrando que esta información se puede utilizar para la determinación del caudal, y para garantizar un mejor manejo de los recursos acuáticos. Vazquez et al. [29] determinaron a través de modelos aditivos generalizados que géneros como *Baetodes* (Ephemeroptera: Baetidae), *Anacroneuria* (Plecoptera: Perlidae) y *Atopsyche* (Trichoptera: Hydrobiosidae) (géneros también presentes en Costa Rica), pueden ser utilizados como indicadores de caudal debido a su preferencia por hábitats con corrientes rápidas, y que podrían ser afectadas por una disminución del caudal. De acuerdo con los requerimientos de estas especies los autores hacen la recomendación del caudal y sobre otras características que deberían mantenerse en el río para proteger estas especies. Finalmente, Arthington et al. [30] hicieron una revisión de 13 casos donde se utilizaron diferentes metodologías para determinar el caudal ambiental en 10 países. Entre otros resultados, los autores detectaron problemas y fortalezas de las diferentes metodologías utilizadas. Sin embargo, para todos los casos concluyen que, al implementarse los caudales estimados, los ecosistemas acuáticos se beneficiaron de diferentes formas como: aumentando la cantidad de hábitat para peces y macroinvertebrados, se incrementó la visitación de animales, aumentó el acceso a las llanuras aluviales, y aumentaron los bosques de galería.

Las conclusiones a las que llegan Arthington et al. [30] en relación con la mejora de los ecosistemas acuáticos al implementar el caudal ambiental, puede estar relacionado a que, en el caso de la metodología hidrobiológica, se estudia la relación entre el régimen de flujo y la respuesta ecológica de los organismos, la cual es muy importante para mitigar el impacto que podría generar la modificación del caudal ambiental. Al incorporar datos biológicos con hidrológicos, se puede proponer estrategias de manejo sostenible en cuencas que

permitan mantener los ecosistemas ecológicamente estables, pero que a su vez permitan el aprovechamiento del recurso por parte de las comunidades. Por este motivo, se recomienda el uso de esta metodología en ríos que se encuentran en áreas protegidas y cuando se quiere determinar el impacto de actividades humanas sobre los ecosistemas acuáticos.

Metodología Holística

Cuando se interrelacionan las condiciones hidrológicas de un lugar, con los ecosistemas asociados y la población humana con su amplia diversidad de aprovechamientos del agua, se da el surgimiento de las metodologías holísticas para la integración de todos los aspectos. Las metodologías holísticas son métodos integrales y que requieren de aportaciones y conocimientos multidisciplinares [20]. Las metodologías pueden ser "bottom-up" diseñados para construir un régimen de caudales modificado mediante la adición de componentes del caudal a una línea de base de caudales nulos, y "top-down", el cual indica cuanto se puede modificar el régimen de caudal de un río antes de que los ecosistemas acuáticos cambien notablemente o se degrade gravemente [31].

Río Tempisque

La cuenca del río Tempisque es la más grande de Costa Rica con una extensión de 5404,6 km^2 ocupa un 53% del territorio de la provincia de Guanacaste. Tiene una elevación media de 220 m.s.n.m. y una temperatura media anual de 26,78 °C aproximadamente. Sus condiciones climáticas se caracterizan por una extensa época seca, que provoca que algunas partes de la cuenca, así como sus afluentes se sequen en su totalidad; en tanto que en la época lluviosa se presentan desbordamientos [32]. La disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca se ha visto amenazada por el aumento y sobreexplotación del agua superficial y subterránea, la deforestación en sitios de importancia hídrica para el desarrollo de otras actividades, lo cual afecta el comportamiento natural del río y pone en peligro las funciones ecológicas de la cuenca, sobre todo durante la estación seca cuando se dan bajas condiciones de caudal y extracciones de agua por concesiones [32], [33]. Estas alteraciones impactan directamente la dinámica natural del río, y en consecuencia, el hábitat de las especies de fauna que dependen de él. Asimismo, limita el otorgamiento de nuevas concesiones de agua, lo que resalta la necesidad de establecer un caudal ambiental.

En este contexto, el estudio de Jiménez Ramón et al. constituye un referente técnico y conceptual inicial para la gestión de la cuenca del río Tempisque [34]. Dadas las características que presenta la cuenca, como: una marcada estacionalidad, una importante cantidad de concesiones, diferentes usos sociales (extracción de arena, agricultura y ganadería, turismo), así como una gran diversidad biológica asociada ya que atraviesa zonas protegidas como los Parques Nacionales Guanacaste y Palo Verde, la Reserva Biológica Lomas de Barbudal, los Refugios de Vida Silvestre Cipancí y Dr Rafael Lucas Rodríguez, y alimenta humedales como los de Corral de Piedra; se determinó que el método más apropiado para la determinación del caudal ambiental es el holístico. En un área de esta complejidad es importante incluir en el proceso a las partes interesadas como las comunidades locales, las municipalidades, las industrias, el sector agrícola, organismos gubernamentales locales y nacionales, ONGs, instituciones científicas, y organismos de conservación de la naturaleza, entre otros. Estos grupos representan inevitablemente una amplia variedad de puntos de vista, y es poco probable que lleguen a un consenso ante una solicitud aislada para que se acepte que parte del agua del río no esté disponible para su consumo; sin embargo, aplicando la metodología holística se puede obtener un criterio que permita aprovechar el recurso de una forma integral y sostenible.

Río Sarapiquí

El río Sarapiquí, aún en etapa de estudio para determinación de caudal ambiental, nace en las faldas del volcán Barva a 1650 msnm y desemboca en el río San Juan a 17 msnm y tiene una extensión de 2025 km^2, la cuenca presenta un clima tropical lluvioso como una precipitación anual entre 3000 y 5000 [35], [36]. La cobertura predominante es el bosque (54,7% del área); 51,4% de esta cobertura se encuentra dentro de áreas silvestres protegidas en la parte alta de la cuenca [35], también alberga zonas de pastizales. En la cuenca se registran 51 comunidades y 71 asentamientos campesinos, principalmente en la cuenca media, la población se dedica a labores agrícolas y ganaderas, también se ha dado una importante expansión de monocultivos como piña y banano. La cuenca del río Sarapiquí es una región de gran importancia natural y económica debido a las diversas actividades que se desarrollan en ella, como la agricultura, la industria agrícola, el comercio, la extracción de recursos naturales y el turismo.

De acuerdo con Sánchez et al. [35] el desarrollo antropogénico en la cuenca ha llevado a una alta dependencia de las actividades en los cauces principales, lo que ha aumentado el acceso a las márgenes de los ríos por parte de pobladores y turistas, generando problemas de contaminación y afectando la calidad y cantidad del agua. Por lo que, para preservar la calidad del agua en la cuenca, es esencial adoptar un enfoque integral que incluya la mitigación de focos de contaminación mediante la corrección de prácticas productivas y la educación ambiental en las comunidades cercanas a los cursos de agua. En este contexto, la implementación de una metodología de caudal ambiental en la cuenca del río Sarapiquí permitiría mantener el equilibrio de los componentes naturales involucrados en el ciclo hidrológico y proteger la integridad de los sistemas ecológicos. De esta manera se podría asegurar el uso sostenible del recurso hídrico por parte de las actividades humanas, garantizando un régimen hidrológico adecuado y una calidad de agua apropiada [1].

La metodología holística a nivel global tiene menor cantidad de estudios si se compara con las otras metodologías anteriormente detalladas, esto debido a que suele ser más costosa al tener que implementar más aspectos a evaluar [37]. Sin embargo, suelen ser más completas y dar una visión más amplia del uso que se le da al río. En la revisión sobre caudales ambientales en la India, realizado por Verma et al. [37], mencionan que en los ríos Ganga y Alaknanda-Bhagirathi, determinaron un caudal ambiental del 72% del caudal promedio anual para la cuenca media y uno de 47% para la cuenca baja. El estudio consideró múltiples subcomponentes, incluyendo hidrología, geomorfología fluvial, hidráulica, calidad del agua, biodiversidad, medios de vida y aspectos culturales/espirituales.

Otro ejemplo, es el estudio realizado por Wei et al. [38] aplicando un método holístico mejorado para determinar el caudal ambiental en la sección de Shaanxi de la cuenca del río Wei, una región que enfrenta una intensa competencia por el uso del agua y graves problemas ambientales, similar a lo que se observa en la cuenca del Tempisque. Este método mejorado integró varios modelos y técnicas para calcular el agua requerida para cuatro subcomponentes del caudal ambiental (flujo ecológico básico para la existencia de peces, demanda de agua para el transporte de sedimentos, flujo ambiental para la calidad del agua, y demanda de agua para paisajes acuáticos), considerando además principios clave como el balance hídrico (incluyendo el flujo de afluentes y la captación de agua en secciones clave) y la regionalización de la función eco-ambiental. Crucialmente, los investigadores aplicaron la teoría de las partes interesadas (stakeholders) en el desarrollo de recursos hídricos, proponiendo que el gobierno actúe como representante del beneficio público del ecosistema y participe en discusiones de mesa redonda para coordinar la competencia de uso del agua. Este último apartado es lo que se quiere lograr con el método holístico, donde hay una participación activa de investigadores, comunidades asociadas a las cuencas de interés y del gobierno.

Tong et al. [39] aplicaron esta metodología en el río Yen de Vietnam; y aunque los autores no tomaron datos biológicos, si tuvieron acceso a bases de datos para la determinación del caudal. De esta forma, lograron establecer un régimen de caudal para las diferentes estaciones y para diferentes áreas del río, lo que representa una estimación más robusta al no recomendar únicamente un caudal mínimo para todo el año. Finalmente, en la revisión realizada por Arthington et al. [30] otra de las conclusiones a las que llegan los autores es que, para lograr un mejor manejo de los recursos hídricos, y tener una mejor estimación del caudal, es recomendable utilizar una metodología integral como la holística, ya que permite obtener resultados más robustos, e involucrar a las diferentes partes interesadas de la sociedad. Por estos motivos, concluimos que para realizar un manejo adecuado del recurso hídrico de cuencas con características complejas y que presenten diferentes usos como las de los ríos Tempisque y Sarapiquí, es recomendable utilizar la metodología holística, ya que es la más apropiada para garantizar que el recurso hídrico pueda estar disponible no solo para los usos productivos, sino también para los organismos que lo habitan, y las comunidades que se encuentran alrededor.

Conclusiones

Queda evidenciado que las metodologías para determinación de caudal ambiental requieren un análisis previo de las características del sitio donde se desea implementar el cálculo, ya que las condiciones ecológicas, hidrogeomorfológicas y de aprovechamiento del agua, pueden guiar los criterios de selección. La incertidumbre de los resultados con cada metodología va a depender de la cantidad y calidad de la información de entrada más que de la metodología por sí misma, no obstante, en igualdad de condiciones, será siempre mejor la metodología que analice la mayor cantidad de variables y sus interacciones, y siempre y cuando permita el objetivo de implementar el caudal ambiental en la gestión del recurso hídrico. En términos prácticos, ninguna metodología es mejor que otra, sino que cada una se aplica sobre los aspectos de disponibilidad de información para el logro de un resultado útil.

La metodología hidrológica es apta para ser aplicada en lugares donde las condiciones no permiten llevar a cabo el muestreo de otras variables o cuando se conoce de antemano que no hay presencia de indicadores biológicos, como es el caso del río Birrís. O bien cuando se quiere hacer un aprovechamiento a pequeña escala, con poca extracción de agua.

La metodología hidrobiológica, además de la modelación hidrológica que se genera a partir de los registros de datos hidrometeorológicos, integra el análisis de especies de peces y macroinvertebrados acuáticos y su relación con variables hidráulicas del río para conseguir la simulación de hábitat que, determina en gran medida el caudal ambiental en un sitio específico, tal y como se ha aplicado en los ríos Pejibaye y Pirrís, este último, bajo el enfoque de detección de impactos por la presencia y operación del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís.

La metodología holística, integra un componente más a los procesos de cálculo de la metodología hidrobiológica en combinación con variables hidráulicas, se trata del componente social, mismo que busca rescatar y validar tanto los usos productivos como los usos domésticos, recreativos y culturales de las poblaciones cercanas al río, tal es la experiencia de cálculo generada en el río Tempisque y más recientemente en el río Sarapiquí.

La ruta de investigación en caudal ambiental gestada desde el Centro de Investigación y Extensión en Tecnología e Ingeniería Agrícola y el Centro de Investigación en Biotecnología del Instituto Tecnológico de Costa Rica, colocan al TEC como ente pionero y referente en este tema tan importante para la gestión integrada del recurso hídrico en el país.

Agradecimientos

Dirección de Agua, Ministerio de Ambiente y Energía

Instituto Costarricense de Electricidad

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados

Referencias

[1] Y. Martínez Valdés y V. M. Villalejo García, "A 10 años de la declaración de Brisbane: Mirada a los caudales ecológicos y ambientales", *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 39, núm. 2, pp. 16–30, 2018, [En línea]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000200002&lng=es&tlng=es

[2] The Brisbane Declaration, "Environmental flows are essential for freshwater ecosystem health and human well-being", en *10th International River Symposium and International Environmental Flows Conference*, Brisbane, Australia: Conservation Gateway, sep. 2007. [En línea]. Disponible en: https://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/Freshwater/EnvironmentalFlows/MethodsandTools/ELOHA/Pages/Brisbane-Declaration.aspx

[3] I. C. Overton *et al.*, "Implementing environmental flows in integrated water resources management and the ecosystem approach", *Hydrological Sciences Journal*, vol. 59, núm. 3–4, pp. 860–877, abr. 2014, doi: 10.1080/02626667.2014.897408.

[4] Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura (UNESCO), *Qué son los caudales ambientales y cuál es la perspectiva de su aplicación en Uruguay*, vol. 34. Montevideo, Uruguay: PHI-LAC, 2014. [En línea]. Disponible en: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000227701.locale=en

[5] M. Kuemmerlen, P. Reichert, R. Siber, y N. Schuwirth, "Ecological assessment of river networks: From reach to catchment scale", *Science of The Total Environment*, vol. 650, pp. 1613–1627, feb. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.019.

[6] Comisión de Caudal Ambiental, "Guía de selección de metodologías para la estimación del caudal ambiental en Costa Rica", mar. 2019. [En línea]. Disponible en: https://da.go.cr/wp-content/uploads/2021/02/GUIA-SELECCION-METODOLOGIAS-ESTIMACION-CAUDAL-AMBIENTAL-EN-COSTA-RICA.pdf

[7] Global Water Partnership (GWP), "La situación de los recursos hídricos en Centroamérica: Hacia una gestión integrada", Tegucigalpa, Honduras, 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/situacion-de-los-recursos-hidricos_fin.pdf

[8] H. G. Hidalgo León, "Los recursos hídricos en Costa Rica: Un enfoque estratégico", en *Manografías del agua*, Universidad de Costa Rica, 2012, pp. 203–219. [En línea]. Disponible en: https://www.kerwa.ucr.ac.cr/items/09e1f407-e68e-4e68-ab76-de4e808a6596

[9] L. Van Niekerk *et al.*, "An environmental flow determination method for integrating multiple-scale ecohydrological and complex ecosystem processes in estuaries", *Science of The Total Environment*, vol. 656, pp. 482–494, mar. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.276.

[10] C. F. Hao, L. M. He, C. W. Niu, y Y. W. Jia, "A review of environmental flow assessment: methodologies and application in the Qianhe River", *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 39, núm. Art. no. 012067, ago. 2016, doi: 10.1088/1755-1315/39/1/012067.

[11] I. Guzmán-Arias, F. Watson, y K. Villagra-Mendoza, "Determinación del caudal ambiental en el río Birrís, Costa Rica", *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 32, núm. 4, pp. 18–27, oct. 2019, doi: 10.18845/tm.v32i4.4786.

[12] F. Watson-Hernández, L. Chavarría-Pizarro, F. Quesada-Alvarado, y I. Guzmán-Arias, "Determinación del caudal ambiental mediante una metodología hidrobiológica, considerando variables de cambio climático en el río Pejibaye, Cartago, Costa Rica", *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 34, núm. 4, pp. 118–129, sep. 2021, doi: 10.18845/tm.v34i4.5223.

[13] L. Chavarría-Pizarro *et al.*, "Determination of environmental flow using a holistic methodology in three river paths in the Tempisque River Basin, Costa Rica", *Hydrology*, vol. 11, núm. 10, Art. no. 159, sep. 2024, doi: 10.3390/hydrology11100159.

[14] J. Alvarez y J. Huamán, "Hydrological models for the estimation of ecological flow", *Manglar*, vol. 19, núm. 2, pp. 201–207, jun. 2022, doi: 10.17268/manglar.2022.025.

[15] E. Lianes, M. Marchamalo, y M. Roldán, "Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís, Costa Rica", *Agronomía Costarricense*, vol. 33, núm. 2, pp. 217–235, may 2009, doi: 10.15517/rac.v33i2.6722.

[16] S. Shaeri Karimi, M. Yasi, y S. Eslamian, "Use of hydrological methods for assessment of environmental flow in a river reach", *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 9, núm. 3, pp. 549–558, jul. 2012, doi: 10.1007/s13762-012-0062-6.

[17] L. Książek, A. Woś, J. Florek, M. Wyrębek, D. Młyński, y A. Wałęga, "Combined use of the hydraulic and hydrological methods to calculate the environmental flow: Wisloka river, Poland: case study", *Environ Monit Assess*, vol. 191, núm. 4, Art. no. 254, abr. 2019, doi: 10.1007/s10661-019-7402-7.

[18] U. Sharma y V. Dutta, "Establishing environmental flows for intermittent tropical rivers: Why hydrological methods are not adequate?", *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 17, núm. 5, pp. 2949–2966, may 2020, doi: 10.1007/s13762-020-02680-6.

[19] F. Armas-Vargas, O. Escolero, D. García de Jalón, L. Zambrano, M. González del Tánago, y S. Kralisch, "Proposing environmental flows based on physical habitat simulation for five fish species in the Lower Duero River Basin, Mexico", *Hidrobiológica*, vol. 27, núm. 2, pp. 185–200, ago. 2017, [En línea]. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0188-88972017000200185&lng=pt&nrm=iso

[20] S. Schmutz y J. Sendzimir, Eds., *Riverine Ecosystem Management*, 1a ed. Cham, Suiza: Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-73250-3.

[21] C. A. Zuleta Salmón, "Análisis del comportamiento del recurso hídrico ante cambios en el uso del suelo y el cambio climático en la cuenca del Río Pejibaye, Costa Rica", Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Cartago, Costa Rica, 2013. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/9025

[22] Z. S. Dewson, A. B. W. James, y R. G. Death, "A review of the consequences of decreased flow for instream habitat and macroinvertebrates", *J North Am Benthol Soc*, vol. 26, núm. 3, pp. 401–415, sep. 2007, doi: 10.1899/06-110.1.

[23] N. Rojas-Morales, *Estudio de cuencas hidrográficas de Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica (IMN), 2011. [En línea]. Disponible en: http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/estudio-de-las-cuencas-hidrograficas-de-costa-rica/

[24] M. Chinchilla, A. Alvarado, y R. Mata, "Capacidad de las tierras para uso agrícola en la subcuenca media-alta del río Pirrís, los Santos, Costa Rica", *Agronomía Costarricense*, vol. 35, núm. 1, pp. 109–130, 2011, [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242011000100006&lng=en&tlng=es.

[25] A. Farah Pérez, "Fragmentación del hábitat por represas hidroeléctricas para la ictiofauna dulceacuícola en Costa Rica", Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2016. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/items/e8b1a144-1be0-4344-8ede-511591b2ab8f

[26] A. Gutiérrez Arguedas, "'¡Ríos para la vida!' Conflictos socio-ambientales por proyectos hidroeléctricos y el movimiento social en defensa de los ríos en Costa Rica", en *Agua y poder en Costa Rica*, F. Alpízar R, Ed., San José, Costa Rica: Centro de Investigación y Estudios Políticos, Escuela de Ciencias Políticas, Vicerrectoría de Investigación, Universidad de Costa Rica, 2019, 2, pp. 53–104. [En línea]. Disponible en: https://www.kerwa.ucr.ac.cr/items/2b5c6f4f-fdf0-4ff3-87ce-99a36f95c1d2

[27] N. J. Bipa, G. Stradiotti, M. Righetti, y G. R. Pisaturo, "Impacts of hydropeaking: A systematic review", *Science of The Total Environment*, vol. 912, núm. Art. no. 169251, feb. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.169251.

[28] B. Pinna, A. Laini, G. Negro, G. Burgazzi, P. Viaroli, y P. Vezza, "Physical habitat modeling for river macroinvertebrate communities", *J Environ Manage*, vol. 358, núm. Art. no. 120919, may 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120919.

[29] R. Vázquez, D. Vimos-Lojano, y H. Hampel, "Habitat Suitability Curves for Freshwater Macroinvertebrates of Tropical Andean Rivers", *Water (Basel)*, vol. 12, núm. 10, Art. no. 2703, sep. 2020, doi: 10.3390/w12102703.

[30] A. H. Arthington *et al.*, "Accelerating environmental flow implementation to bend the curve of global freshwater biodiversity loss", *Environmental Reviews*, vol. 32, núm. 3, pp. 387–413, sep. 2024, doi: 10.1139/er-2022-0126.

[31] N. L. Poff, R. E. Tharme, y A. H. Arthington, "Evolution of environmental flows assessment science, principles, and methodologies", en *Water for the environment*, Avril C. Horne, J. Angus Webb, Michael J. Stewardson, Brian Richter, y Mike Acreman, Eds., Londres, Reino Unido: Academic Press, 2017, 11, pp. 203–236. doi: 10.1016/B978-0-12-803907-6.00011-5.

[32] G. Barrantes Moreno, "Evaluación del servicio ambiental hídrico en la cuenca del río Tempisque (Costa Rica) y su aplicación al ajuste de tarifas", *Revista Lebret*, vol. 0, núm. 2, pp. 131–160, dic. 2010, doi: 10.15332/rl.v0i2.668.

[33] D. Carvajal Vanegas, "Dinámica hídrica bajo condiciones climáticas cambiantes en la subcuenca del río Tempisquito, cuenca del Tempisque, Guanacaste, Costa Rica", Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Cartago, Costa Rica, 2017. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8705

[34] J. A. Jiménez Ramón, J. Calvo, F. Pizarro, E. González, y A. Jiménez Hernández, *Conceptualización de caudal ambiental en Costa Rica*. San José, Costa Rica: UICN ORMA, 2005. [En línea]. Disponible en: https://iucn.org/es/content/conceptualizacion-de-caudal-ambiental-en-costa-rica

[35] K. Sánchez, F. Jiménez, S. Velásquez, M. Piedra, y E. Romero, "Metodología de análisis multicriterio para la identificación de áreas prioritarias de manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Sarapiquí, Costa Rica", *Recursos Naturales y Ambiente*, núm. 41, pp. 88–95, mar. 2004, [En línea]. Disponible en: https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/7154

[36] E. Céspedes Vargas, G. Umaña Villalobos, y A. M. Silva Benavides, "Tolerancia de diez especies de diatomeas (Bacillariophyceae) a los factores físico-químicos del agua en el Río Sarapiquí, Costa Rica", *Rev Biol Trop*, vol. 64, núm. 1, pp. 105–116, jun. 2016, doi: 10.15517/rbt.v64i1.18295.

[37] R. K. Verma, A. Pandey, S. Verma, y S. K. Mishra, "A Review of Environmental Flow Assessment Studies in India with Implementation Enabling Factors and Constraints", *Ecohydrology & Hydrobiology*, vol. 23, núm. 4, pp. 662–677, oct. 2023, doi: 10.1016/j.ecohyd.2023.06.006.

[38] N. Wei, K. Lu, J. Xie, y F. Yang, "Research on eco-environmental flow based on the improved holistic method and its application in Wei River Basin", *Water Supply*, vol. 22, núm. 8, pp. 6648–6659, ago. 2022, doi: 10.2166/ws.2022.278.

[39] T. P. Tong *et al.*, "Applying a Holistic Approach to Environmental Flow Assessment in the Yen River Basin", *Water (Basel)*, vol. 16, núm. 8, Art. no. 1174, abr. 2024, doi: 10.3390/w16081174.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Análisis espectroscópico de billetes poliméricos de la segunda serie de Costa Rica

Spectroscopic analysis of polymer banknotes from the second series of Costa Rica

James Andrés Ruiz-Vásquez[1], Ernesto Montero-Zeledón[2]

Fecha de recepción: 25 de marzo, 2025
Fecha de aprobación: 18 de julio, 2025

Ruiz-Vásquez, J.A; Montero-Zeledón, E. Análisis espectroscópico de billetes poliméricos de la segunda serie de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 1. Enero-Marzo, 2026. Pág. 116-129.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i1.7860

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
jamesandresruizvasquez@gmail.com
https://orcid.org/0009-0005-4395-4933
2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
emontero@tec.ac.cr
https://orcid.org/0000-0002-4545-5805

Palabras clave

Análisis comparativo; numismática; espectroscopía; fluorescencia; propiedad física; radiación ultravioleta; seguridad.

Resumen

La falsificación de billetes es un problema persistente en Costa Rica, por lo que garantizar su autenticidad es esencial para la seguridad económica y la confianza en el sistema financiero. Para ello, los billetes incorporan diversas medidas de seguridad, entre las que destacan las marcas fluorescentes, visibles únicamente bajo luz ultravioleta. Este artículo tiene como objetivo estudiar las propiedades espectroscópicas de las marcas de seguridad en los billetes de Costa Rica, como medio para la diferenciación de billetes falsos y auténticos, así como para establecer propiedades útiles en procesos de control de calidad. Para ello, se aplicaron técnicas de espectroscopia infrarroja y de fluorescencia en zonas clave del billete, para la identificación de máximos de excitación, emisión y absorbancia. Los resultados mostraron patrones de emisión fluorescentes similares entre diferentes denominaciones, con variaciones de intensidad en distintas zonas del mismo billete. Además, se identificaron características del sustrato de los billetes concordantes con el material especificado. Este análisis contribuye a mejorar la detección de billetes falsos y los métodos de autenticación, pero también al establecimiento de una línea de investigación pertinente en el ámbito nacional.

Keywords

Comparative analysis; fluorescence; money; physical property; security; spectroscopy; ultraviolet radiation.

Abstract

Counterfeiting of banknotes is a persistent problem in Costa Rica, making it essential to ensure their authenticity for economic security and confidence in the financial system. For this reason, banknotes incorporate various security features, notably fluorescent marks visible only under ultraviolet light. This article aims to study the spectroscopic properties of security marks on Costa Rican banknotes to differentiate counterfeit from authentic banknotes and to establish properties useful for quality control processes. Therefore, fluorescence and infrared spectroscopy techniques were applied to key areas of the banknotes to identify excitation, emission, and absorbance maxima. Results showed similar fluorescent emission patterns across different denominations, although variations in intensity were observed in different areas of the same banknote. Additionally, the identified characteristics of the banknote substrate were consistent with the specified material. This analysis contributes to improving the detection of counterfeit banknotes and authentication methods, as well as to establishing a relevant line of research at the national level.

Introducción

La falsificación de billetes es un delito que se presenta cada vez con mayor frecuencia, buscando imitar las características auténticas de seguridad mediante técnicas cada vez más sofisticadas [1]. Solo en el 2023, el Banco Central de Costa Rica (BCCR) reportó 1682 unidades falsas de todas las denominaciones y series, que equivalen a 18 253 000 colones [2]. Por ende, el reto más grande de la nueva generación de billetes es incrementar la tecnología detrás de las marcas de seguridad como una forma de prevenir la falsificación [3]. Ejemplo de ello es la

incorporación de un nuevo sustrato de polímero en la impresión de la reciente familia de billetes de Costa Rica [4]. Esto redujo los costos de emisión, aumentó la vida útil y disminuyó el riesgo de falsificación [5].

No obstante, los estudios académicos en Costa Rica sobre marcas de seguridad en billetes son nulos o muy escasos. En otros países, las investigaciones se enfocan en caracterizar desde propiedades ópticas, hasta propiedades de sustratos, tintas y pigmentos de los billetes. En un estudio de Ferrero [6], se desarrolla una técnica para la detección automatizada de fibras luminiscentes para la identificación de falsificaciones. En una revisión de Wang [7], se ofrece una mejora de los materiales de las marcas de seguridad en billetes, tales como el desarrollo de sustratos resistentes, tintas de seguridad y materiales con funciones antifalsificación.

Por otra parte, algunas investigaciones han sido enfocadas en el desarrollo de metodologías para la autenticación de billetes mediante características espectroscópicas. En un estudio de Novais [8], se establecen metodologías de caracterización para la comparación de billetes auténticos con falsificaciones, mediante fluorescencia de rayos X y espectroscopía Raman. En una investigación realizada por Mikulicova [9], se caracterizaron pigmentos fluorescentes en billetes de sustrato polimérico de diversos países. En otros estudios académicos de Sonnex [10], Correia [11], Oliveira [12] e Itrić [13], se emplea la espectroscopía infrarroja para la identificación de alteraciones, análisis y evaluación de la autenticidad de los billetes.

El presente artículo tiene como objetivo estudiar las propiedades espectroscópicas de las marcas de seguridad fluorescentes en los billetes de Costa Rica, para la diferenciación de billetes falsos y auténticos, el control de calidad y fomentar el uso de nuevas técnicas para la caracterización y conservación de colecciones. Por ende, se interpretan espectros de emisión, excitación e infrarrojo de las marcas de seguridad fluorescentes presentes en los billetes poliméricos de la segunda serie de Costa Rica, actualmente en circulación. Estos estudios permiten establecer otras características de referencia, con las cuales los examinadores podrían autenticar los elementos de seguridad. Además, da paso a la generación de conocimiento sobre los materiales del sustrato, tintas y dispositivos que permitan mejorar las características de seguridad.

Espectroscopía en billetes

Características de seguridad

El BCCR actualiza periódicamente las series de billetes, mejorando las características técnicas de seguridad. Estas se dividen en dos tipos: las visibles y perceptibles al tacto, y aquellas que requieren instrumentos especializados como lupas, lámparas ultravioletas o visores infrarrojos [14]. En los billetes de Costa Rica se emplean ambos tipos para prevenir la falsificación [4], incluyendo técnicas como la impresión en intaglio, marcas de agua, elementos fluorescentes mediante pigmentos luminiscentes, marcas iridiscentes, dispositivos ópticamente variables (OVD), microimpresiones, bandas magnéticas, pigmentos infrarrojos y otros elementos de seguridad de tercer nivel utilizados únicamente por el Banco Central [15].

Para analizar las marcas de seguridad de segundo nivel son imprescindibles instrumentos especializados como espectrofluorímetros y espectrómetros infrarrojos. De esta forma, es posible medir atributos de las propiedades del sustrato del billete y características de los pigmentos fluorescentes que están presentes en toda la gama de denominaciones.

El espectro electromagnético de la luz

Al conjunto de todas las longitudes de ondas electromagnéticas se le denomina espectro electromagnético [16]. Las ondas electromagnéticas pueden ser clasificadas según su longitud de onda, o de forma equivalente, por su energía y frecuencia. En este contexto es conveniente considerar la radiación electromagnética desde la perspectiva cuántica, donde la radiación se compone de paquetes de energía denominados fotones [17]. Así, la energía de una onda electromagnética también puede ser visualizada como la energía de un fotón mediante la ecuación (1).

$$E = h\,\nu = \frac{h\,c}{\lambda} \tag{1}$$

Donde *E* es la energía del fotón, h es la constante de Planck, ν es la frecuencia de la onda electromagnética, c es la velocidad de la luz y λ es la longitud de la onda electromagnética [17]. Por ende, la energía electromagnética es proporcional al recíproco de la longitud de onda.

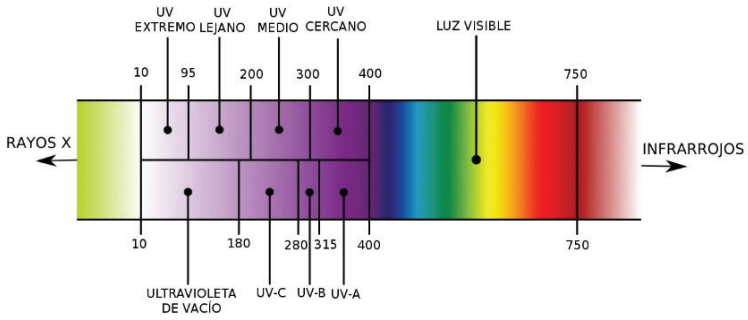


Figura 1. Espectro electromagnético ultravioleta y visible. Fuente: [18]

La región ultravioleta (UV) está definida en el rango de 10 nm a 400 nm aproximadamente, como se observa en la *Figura 1*. Esta radiación se origina en las capas externas de la nube electrónica de los átomos, principalmente cuando se dan saltos energéticos entre sus estados [16]. La luz visible está comprendida en el rango de 400 nm a 750 nm aproximadamente, y se produce generalmente por una reorganización de los electrones externos en átomos y moléculas. El ser humano percibe esta región del espectro en forma de colores debido a una respuesta fisiológica y psicológica [16]. Por su parte, la región infrarroja del espectro electromagnético es la menos energética de la región UV-VIS-IR, la cual tiene su origen en las vibraciones y rotaciones moleculares [16].

Luminiscencia

La luminiscencia es la emisión de radiación visible por un átomo o molécula en el momento de una transición electrónica de mayor a menor energía, debido a la excitación previa de sus electrones [15]. A diferencia de otros fenómenos similares como la incandescencia, la radiación emitida se considera completamente distinta de la producida en virtud de la temperatura. Asimismo, dependiendo de la causa de la excitación de los electrones, la luminiscencia se clasifica en fotoluminiscencia, electroluminiscencia, quimioluminiscencia, bioluminiscencia, cátodoluminiscencia, mecanoluminiscencia y termoluminiscencia [19].

Por lo general, en la fotoluminiscencia la excitación se produce mediante radiación ultravioleta, la cual sigue la ley de Stokes de fluorescencia [19]. Esta condición es expresada en la relación (2), donde la longitud de excitación es más corta que la longitud de onda de emisión [20].

$$\lambda_{exc} < \lambda_{em} \quad (2)$$

Los fotones emitidos son generados a partir de las transiciones electrónicas en el material: la energía es absorbida cuando un electrón cambia a un estado más energético (excitación), pero se emite luz visible cuando vuelve al estado de baja energía (emisión o relajación). En añadidura, dependiendo del tiempo de retardo entre la excitación y la emisión, la luminiscencia se clasifica en dos tipos: fluorescencia; para tiempos de retardo del orden de nanosegundos, y fosforescencia; para tiempos de retardo cercanos o mayores a un segundo [17].

En los billetes, se suelen emplear pigmentos fluorescentes como característica de seguridad de segundo nivel, con longitudes de excitación óptimas de 254 nm y 365 nm principalmente [15], [22]. No obstante, estos pigmentos pueden caracterizarse por las longitudes de onda que absorben o emiten. Las longitudes de onda de excitación no se restringen a la región visible, pues lo habitual es que estén en la región UV [21].

Técnicas espectroscópicas de análisis

La espectroscopía es el desarrollo de procedimientos instrumentales en los que se obtiene información de la estructura molecular, a través de un análisis detallado de la absorción, dispersión y emisión de radiación electromagnética por los compuestos analizados [23]. Así, la espectroscopía de fluorescencia molecular se utiliza para obtener información de la energía de transición electrónica, el entorno molecular y las interacciones intermoleculares que afectan la emisión de fluorescencia [23], [24]. Para estas técnicas espectroscópicas, el rango que suele considerarse es el ultravioleta-visible (UV-VIS).

Además de la espectroscopia de fluorescencia, la espectroscopía infrarroja ha sido ampliamente utilizada para el estudio de los materiales. La energía de los fotones de la región IR no es suficiente para excitar los electrones de los átomos, pero sí para inducir excitaciones vibracionales en los enlaces covalentes de las moléculas. El principio de los espectrómetros IR es similar al principio del espectrómetro UV-VIS, permitiendo obtener la absorción intrínseca que son resultado de la estructura del material [23].

Para el análisis espectroscópico IR, se mide la transmitancia (T) o, de forma alternativa, la absorbancia (A), en función del número de onda, correspondiente al inverso de la longitud de onda de la radiación, con unidades de cm^{-1}. La relación entre absorbancia y transmitancia se expresa en la ecuación (3).

$$A = -\log_{10} T \quad (3)$$

Donde la transmitancia *T* se define como el cociente de la intensidad del haz transmitido y la intensidad del haz incidente. Del análisis de los espectros IR, se obtiene información de los grupos funcionales y de los materiales con enlaces covalentes (orgánicos, cerámicos, poliméricos, etc.), así como de las sustancias presentes, dado que cada compuesto químico posee un espectro único [25].

Cabe señalar que los espectros IR en la región de 1450 cm^{-1} a 600 cm^{-1} se les denomina región de huella digital, debido a la complejidad y exclusividad de los patrones medidos. Por el contrario, en la zona de absorción de los grupos funcionales, correspondiente a la región entre 4000 cm^{-1} a 1450 cm^{-1}, se producen bandas anchas y algunos picos correspondientes a las vibraciones de tensión en las unidades diatómicas [23].

Materiales y métodos

Muestras

Se emplearon billetes de todas las denominaciones actualmente en circulación: mil colones de la serie C, dos mil colones de la serie B, cinco mil colones de la serie C, diez mil colones de la serie B y veinte mil colones de la serie B; obtenidos en la ciudad de Cartago, Costa Rica en julio de 2024. Se aseguró que las muestras estuvieran en buen estado, sin partes faltantes y que las marcas fluorescentes fueran claramente visibles.

Instrumentos y adquisición de datos

Para la identificación de las marcas fluorescentes, se empleó una lámpara UV LED61 de la marca AccuBANKER USA con un máximo de emisión en 365 nm. Seguidamente, se fotografió cada billete iluminado con luz ultravioleta, como se muestra en la *Figura 2*.

Para la medición de los espectros de emisión y excitación, se empleó el espectrofluorímetro FluoroMax Plus de la marca Horiba Scientific, del Laboratorio de Espectroscopía, Imagen y Color (LEMIC) del Tecnológico de Costa Rica. Este se compone de una lámpara de arco de Xenón, un fotomultiplicador sensible de 185 nm a 850 nm y un fotodiodo de referencia. Además, para la selección de la longitud de onda de emisión o excitación en los monocromadores, el espectrofluorímetro integra dos rejillas de difracción de 1200 ranuras/mm.

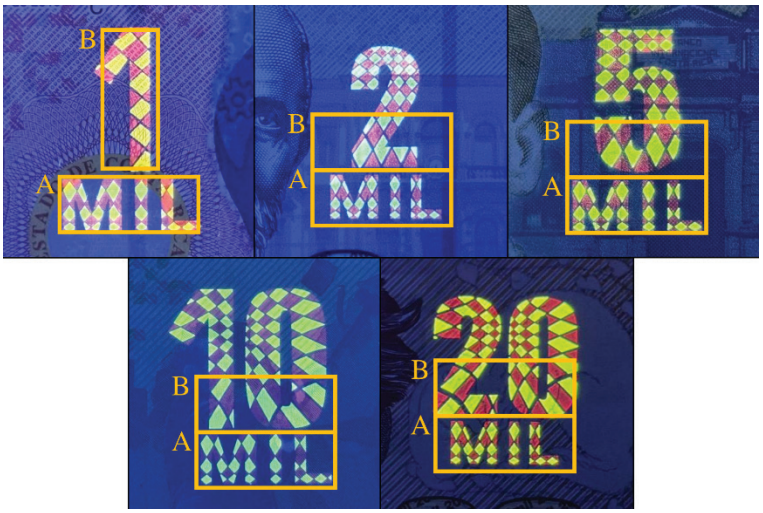


Figura 2. Identificación de las marcas fluorescentes en los billetes donde se realizaron las mediciones de los espectros de emisión y excitación.

Para los espectros de emisión y excitación se tomó un tiempo de integración de 0,1 s y un ángulo de incidencia normal de 10°. Para los espectros de emisión-excitación 3D, se definió un rango de excitación entre 335 nm y 380 nm, y un rango de emisión entre 400 nm y 670 nm. Para cada billete, se delimitaron dos zonas de medición en la marca fluorescente principal de la denominación, tal como se muestra en la *Figura 2*. Además, se tomaron espectros de emisión para una excitación de 365 nm en un rango de 400 nm a 700 nm, y se tomaron los espectros de excitación para las máximas intensidades de emisión en las zonas A y B de los billetes analizados.

Por otra parte, para la medición de los espectros infrarrojos, se empleó el espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR) Nicolet iS5 de la marca Thermo Scientific, del LEMIC. Este posee una resolución espectral de 0,8 cm^{-1} y un rango de medición desde

4000 cm^{-1} hasta 500 cm^{-1}. Se empleó el accesorio de Reflectancia Total Atenuada (ATR), que permite obtener espectros de muestras sin ningún tipo de preparación adicional. Con este equipo se tomó el espectro IR del sustrato en dos posiciones de la ventana transparente, en la palabra "mil" de la marca fluorescente principal y en el mapa iridiscente, tal como se muestra en la *Figura 3*. Este proceso se repitió empleando posiciones relativas aproximadas para todas las denominaciones de billetes analizados. Cabe señalar que se midió un espectro de fondo antes de cada medición y se aplicó un filtro ATR que elimina los máximos de absorbancia debido al CO_2.



Figura 3. Identificación de las marcas en el billete de mil colones donde se realizaron las mediciones de los espectros infrarrojos.

Procesamiento de datos

Para el procesamiento y análisis de los datos obtenidos, se empleó el lenguaje de programación R [26]. En conjunto, se utilizaron paquetes como "tidyverse" [27] para la manipulación de datos, "ggpmisc" [28] como complemento a la generación de gráficas, "photobiology" [29] para la identificación de los máximos locales, "plotly" [30] para la generación de gráficas en tres dimensiones y "cooltools" [31] para la representación de longitudes de onda en formato de color RGB.

A partir de los espectros de fluorescencia, se determinaron los máximos de emisión para diferentes excitaciones y los máximos de excitación que estimulan la emisión. Con los espectros infrarrojos, se determinaron los máximos de absorbancia característicos para cada zona de los billetes analizados. Posteriormente, se compararon los máximos de absorbancia con los expresados en la literatura para la identificación del material del sustrato.

Resultados

Espectros de emisión y excitación

Todos los billetes analizados mostraron máximos de emisión semejantes y un comportamiento espectral similar. Como se muestra en la *Figura 2*, las marcas fluorescentes de todas las denominaciones presentan un patrón en rombos curvo con dos colores principales: rojo y verde amarillo. Pese a ello, los resultados de los máximos de emisión para cada billete analizado se enlistan en el *Cuadro 1* para su comparación. Se observaron pequeñas diferencias en la posición de los máximos entre las dos zonas consideradas del billete, por lo que en el cuadro se representan valores y rangos de longitudes de onda.

Como se observa en el *Cuadro 1*, todos los billetes presentan un máximo de emisión común en 610 nm, correspondiente al color rojo, y entre 586 nm y 590 nm, que corresponde al amarillo. Además, existen diferencias significativas entre denominaciones en los máximos correspondientes al color verde. Pese a las diferencias, la mayoría de los billetes presentan máximos de emisión en posiciones cercanas entre sí. Estas pequeñas discrepancias pueden deberse a la presencia de algún contaminante en el momento de tomar el espectro, al propio desgaste del billete, a cambios en la composición de las tintas de impresión u otras causas en el proceso de producción [9]. Se requieren más estudios que permitan determinar las causas de estas diferencias.

Cuadro 1. Máximos de emisión en la marca fluorescente principal para diversas denominaciones.

Denominación (colones)	Emisión (nm)	Color correspondiente
Mil	608 – 610, 618	Rojo
	586 – 588	Amarillo
	536	Verde
Dos mil	610	Rojo
	588 – 590	Amarillo
	510 – 514	Verde
Cinco mil	610	Rojo
	586 – 590	Amarillo
	514	Verde
Diez mil	610, 620	Rojo
	586 – 588	Amarillo
	506 – 510	Verde
Veinte mil	610, 614, 620	Rojo
	586	Amarillo
	532, 546	Verde

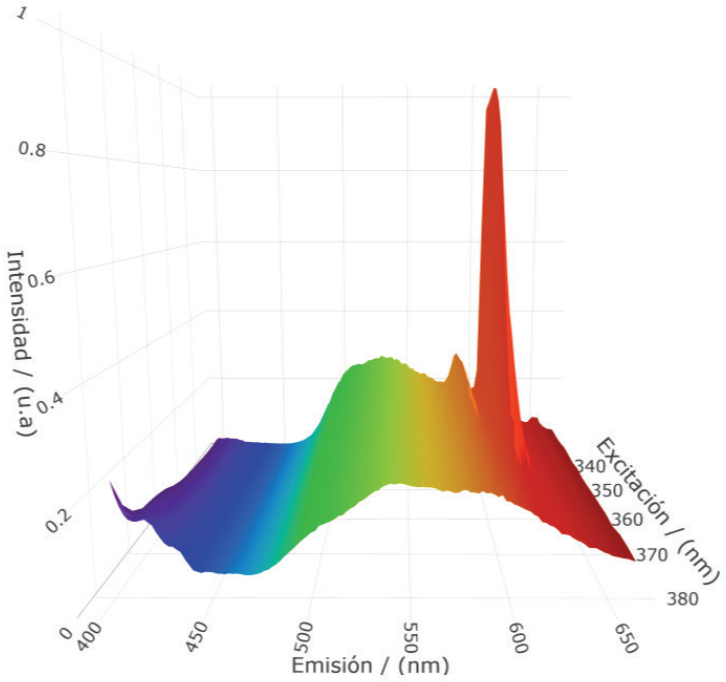


Figura 4. Espectro de emisión-excitación 3D en la zona B del billete de mil colones.

Como se observa en la *Figura 4*, existe una emisión significativa cercana a 610 nm, para excitaciones menores a 360 nm. La mayor intensidad del máximo de emisión en 610 nm podría explicarse porque el área iluminada de los rombos rojos es mayor que el de los rombos verde amarillos de la marca fluorescente, lo que favorece una mayor emisión en las longitudes de onda asociadas al color rojo. Otra causa que podría explicar una mayor intensidad del máximo de 610 nm es la diferencia en la eficiencia cuántica de las tintas fluorescentes.

Además, en la *Figura 4* se identifican otros máximos locales de emisión en 532 nm y 586 nm. Estos máximos están relacionados con los pigmentos fluorescentes que emiten en verde y amarillo, como se detalla en el *Cuadro 1*. Sin embargo, en las imágenes de los billetes solo se distinguen dos colores principales: rojo y verde-amarillo. Esto sugiere que la *Figura 4* representa la superposición de los espectros emitidos por los pigmentos fluorescentes.

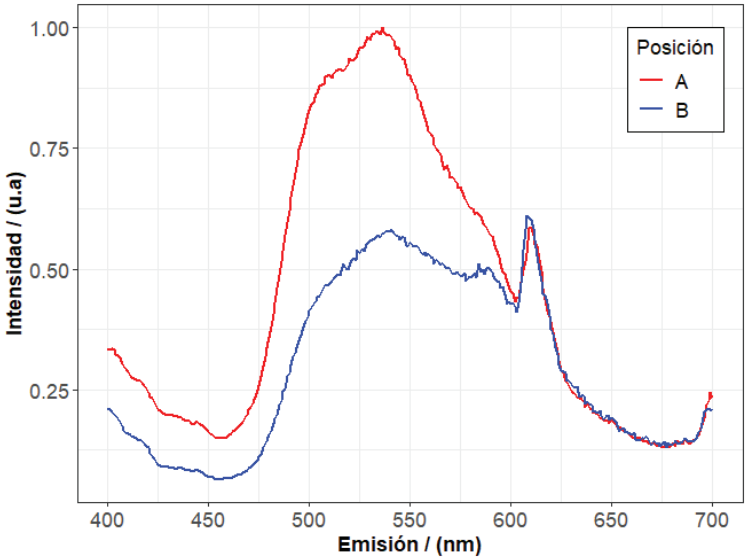
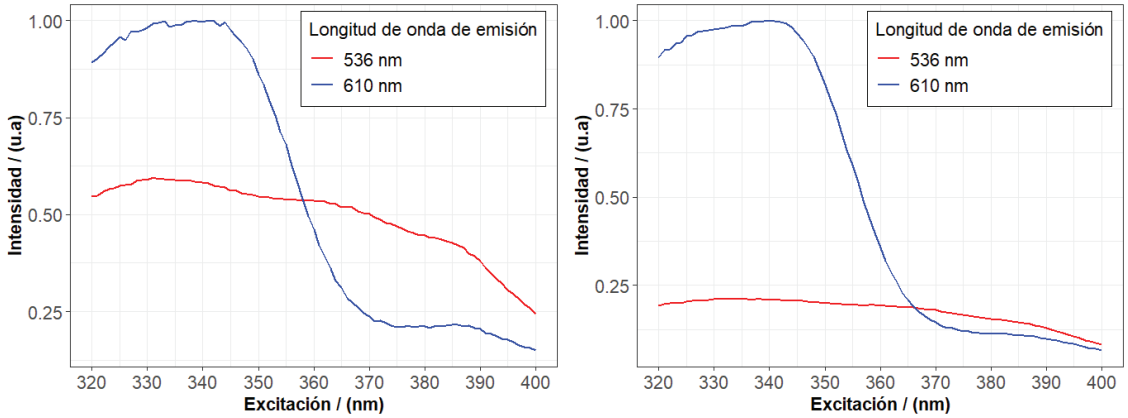


Figura 5. Espectro de emisión de la marca fluorescente en el billete de mil colones para una excitación de 365 nm.

Como se observa en la *Figura 5*, hay una mayor intensidad en la posición A que en la posición B para longitudes de onda entre 400 nm y 600 nm, con máximos de emisión alrededor de 536 nm y 610 nm. De igual forma que en el espectro de emisión-excitación 3D, estas diferencias de intensidad pueden deberse a diferencias en las proporciones de área fluorescente iluminada y a las eficiencias cuánticas de cada pigmento.



(a) Posición A *(b) Posición B*

Figura 6. Espectros de excitación en las zonas analizadas de la marca fluorescente del billete de mil colones, para dos emisiones distintas.

Por otra parte, en la *Figura 6* se presentan los espectros de excitación para las emisiones en 536 nm y 610 nm, en ambas posiciones. Se aprecia que la mayor emisión ocurre en 610 nm cuando la excitación es 341 nm. Para la emisión de 536 nm, el máximo se presenta cuando la excitación es 331 nm, con una menor intensidad relativa en comparación con la emisión de 610 nm. En el *Cuadro 2* se muestran los máximos de excitación para los principales máximos de emisión en todas las denominaciones.

Cuadro 2. Excitaciones asociadas con la emisión máxima en las zonas analizadas para diversas denominaciones.

Denominación (colones)	Máximo de emisión (nm)	Máximo de excitación (nm)
Mil	532	331
	610	341
Dos mil	510	320
	610	339
Cinco mil	510	320
	610	341
Diez mil	510	335
	610	335
Veinte mil	510	335
	610	335

Espectros infrarrojos

Dado que los espectros infrarrojos de todas las denominaciones son similares entre sí, únicamente se presentan los resultados para el billete de mil colones, que se muestra en la *Figura 7*.

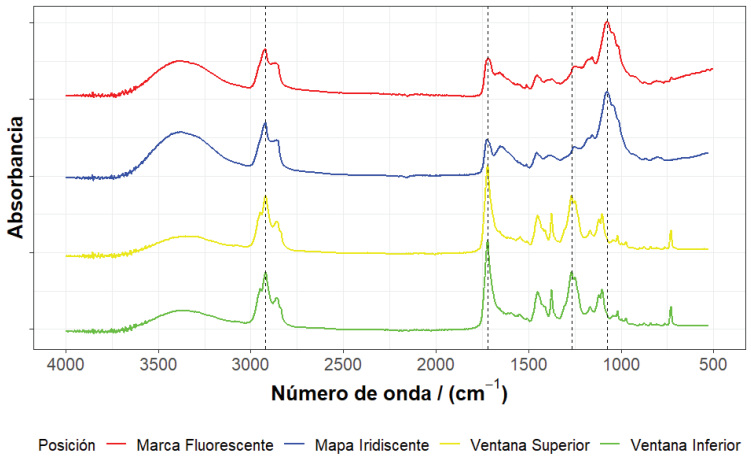


Figura 7. Espectros infrarrojos en zonas clave del billete de mil colones.

Los espectros para la zona inferior y superior derecha de la ventana transparente presentan máximos de absorbancia en las mismas posiciones, con ligeras diferencias en la intensidad. En la región de grupos funcionales, el pico de mayor absorbancia se encuentra en 1720 cm^{-1}, seguido por 2919 cm^{-1}, 2948 cm^{-1}, y 2863 cm^{-1}. Cabe resaltar que dichos máximos concuerdan con los presentados por Smith [31] para el polipropileno, específicamente para las vibraciones de grupos metilo (CH_3) y metileno (CH_2).

En cuanto a la región de huella digital, destacan máximos en 1267 cm^{-1}, 1248 cm^{-1}, 1102 cm^{-1}, así como en 1375 cm^{-1} y 1449 cm^{-1}, siendo estos característicos del sustrato de polipropileno [31]. Por ende, los demás picos de absorbancia en dicha zona pueden deberse a la capa de barniz o a las tintas del billete.

Por otra parte, la absorbancia máxima en el rango de 3500 cm^{-1} a 3000 cm^{-1} corresponde a la presencia de humedad en la medición, la cual se observa en todos los espectros IR medidos. Esto se debe a las vibraciones de tensión de grupos funcionales que contienen hidrógeno, como el hidroxilo (-OH) [23].

En el espectro IR del mapa iridiscente se muestra máximos de absorbancia similares en la región de grupos funcionales. Los más destacables corresponden al sustrato de polipropileno en 2921 cm^{-1}, 1724 cm^{-1} y 2858 cm^{-1}, seguido del máximo por el efecto del agua en 3386 cm^{-1}. No obstante, existen diferencias significativas en la región de huella digital entre la zona de marca fluorescente e iridiscente y la zona de la ventana transparente. Tanto en el mapa iridiscente como la marca fluorescente, resalta un pico de absorbancia en 1076 cm^{-1}, el cual puede deberse a vibraciones de tensión en enlaces del tipo C-C, C-O y C-N, o inclusive a vibraciones de flexión en los compuestos de las tintas [23].

Conclusiones y recomendaciones

A partir del análisis de los espectros de emisión y excitación de las marcas fluorescentes en los billetes actualmente en circulación en Costa Rica, se puede concluir que el comportamiento espectral observado en todas las denominaciones es consistentemente similar, lo que permite utilizar el billete de mil colones como ejemplo representativo. La presencia de máximos de emisión comunes en 610 nm para el color rojo, junto con máximos en 586 nm a 590 nm y 510 nm a 540 nm para el verde amarillo, indica que los materiales fluorescentes utilizados en los billetes presentan características muy semejantes en su color aparente, aunque con diferencias espectroscópicas mesurables cuando se utiliza equipo especializado. Dicha semejanza es crucial en la autenticación de los billetes, pero las pequeñas diferencias resaltan la importancia de las medidas espectrales para el análisis de características de seguridad.

La espectroscopía de fluorescencia permite identificar variaciones en los máximos de emisión entre las diferentes zonas del mismo billete, así como entre diferentes denominaciones. Estas diferencias podrían deberse a factores como el desgaste, exposición a condiciones adversas, diferencias en las tintas, presencia de contaminantes o diferencias en las eficiencias cuánticas de los pigmentos. Por consiguiente, los procesos de autenticación mediante espectroscopía deberían considerar dichas variaciones para evitar errores. Las diferencias encontradas permiten orientar el desarrollo de más estudios para cuantificar la dispersión de las mediciones y la consistencia de los resultados, considerando factores adicionales como la serie de los billetes y la casa fabricante.

Cabe resaltar las diferencias en la intensidad de emisión entre zonas del mismo billete, como se mostró en los espectros del billete de mil colones. La mayor intensidad de emisión del verde o del rojo podría deberse a diferentes proporciones de área excitada de los patrones romboidales fluorescentes, lo que sugiere que la orientación y la posición del billete durante el análisis espectroscópico son factores determinantes. Esto podría controlarse ajustando con precisión la posición de las marcas fluorescentes y reduciendo el tamaño del área excitada.

En cuanto a los espectros IR, se identificaron características típicas del sustrato de los billetes, especialmente en las zonas de la ventana transparente, el mapa iridiscente y la marca fluorescente. La identificación de picos de absorbancia asociados al polipropileno y otros materiales del billete permite corroborar la composición de estos y proporciona características adicionales para la detección de falsificaciones. Las diferencias en la región de huella digital entre la zona del mapa iridiscente y la marca fluorescente, y la zona de la ventana transparente parecen estar asociadas con los compuestos de las tintas.

Finalmente, las mediciones de los espectros IR mostraron un máximo común en la región de 3500 cm^{-1} a 3000 cm^{-1} debido a la presencia de humedad, lo cual es un factor para considerar en futuros análisis. En última instancia, es recomendable realizar los análisis en condiciones ambientales controladas para reducir la influencia de la humedad.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo de la Escuela de Física del Instituto Tecnológico de Costa Rica y de la coordinadora de trabajos finales de graduación, la Dra. Laura Rojas Rojas, por su apoyo en la escritura de artículos científicos como nueva alternativa para cumplir los requisitos de graduación del programa de Licenciatura en Ingeniería Física. Adicionalmente, agradecemos el apoyo del departamento de Emisión y Valores, de la división Sistemas de Pago del Banco Central de Costa Rica, a cargo del Ing. Juan José Leiva, por su apoyo y compromiso en el desarrollo de esta investigación.

Referencias

[1] L. G Ramírez Rivera y R. L. Guerrero Macías, “Características de seguridad en el papel moneda mexicano”, *Skopein: La justicia en manos de la Ciencia*, no. 21, pp. 28-37, 2020. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7701850

[2] Banco Central de Costa Rica, “Numerario presuntamente falso”, 2024. https://www.bccr.fi.cr/billetes-y-monedas/seguridades/contra-la-falsificación-de-numerario [Ingresado el: 23/07/2024].

[3] M. Mann, S. K. Shukla, y S. Gupta, “A comparative study on security features of banknotes of various countries”, *International Journal of Multidisciplinary Research and Development*, vol. 2, no. 6, pp. 83–91, 2015.

[4] M. B. Chacón Hidalgo, *Del papel moneda a los billetes de banco en Costa Rica (siglo XVIII-2018),* 1ra ed. San José, Costa Rica: Fundación Museos Banco Central de Costa Rica, 2019.

[5] K. Corbin, “Falsificación de Polímeros: Ni Sencilla, Ni Barata, Ni Eficaz”, *Currency News*, vol. 20, no. 10, p. 8, 2022.

[6] R. Ferrero y B. Montrucchio, “Banknote identification through unique fluorescent properties”, *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, vol. 21, no. 2, pp. 1–12, Mar. 2024. https://doi.org/10.1109/TDSC.2023.3267166

[7] H. Wang y L. Sun, “Materials and Society: Functional Chemicals and Materials in Banknote and Security Paper”, *Accounts of materials research*, vol. 2, no. 1, pp. 1–6, Jan. 2021. https://doi.org/10.1021/accountsmr.0c00071

[8] A. R. Novais Rodrigues, F. L. Melquiades, C. R. Appoloni, y E. N. Marques, “Characterization of Brazilian banknotes using portable X-ray fluorescence and Raman spectroscopy”, *Forensic Science International*, vol. 302, p. 109872, Sep. 2019. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.06.030

[9] M. Mikulicova, O. Zimek, y V. Kresalek, “FLUORESCENCE OF SELECTED POLYMER BANKNOTES”, *Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium*, pp. 746-752, Jan. 2019. https://doi.org/10.2507/30th.daaam.proceedings.102

[10] E. Sonnex, M. J. Almond, J. V. Baum, y J. W. Bond, “Identification of forged Bank of England £20 banknotes using IR spectroscopy”, *Spectrochimica acta. Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy*, vol. 118, pp. 1158–1163, Jan. 2014. https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.09.115

[11] R. M. Correia et al., “Banknote analysis by portable near infrared spectroscopy”, *Forensic chemistry*, vol. 8, pp. 57–63, May 2018. https://doi.org/10.1016/j.forc.2018.02.003

[12] V. da Silva Oliveira, R. S. Honorato, F. A. Honorato, y C. F. Pereira, “Authenticity assessment of banknotes using portable near infrared spectrometer and chemometrics”, *Forensic science international*, vol. 286, pp. 121–127, May 2018. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.03.001

[13] K. Itrić, M. Vukoje, y D. Banić, “FT-IR spectroscopy as a discrimination method for establishing authenticity of euro banknotes”, *Acta graphica*, vol. 29, no. 2, pp. 27–30, Jan. 2019. https://doi.org/10.25027/agj2017.28.v29i2.156

[14] P. Kumar et al., “Comparative Analysis of Security Features in Banknotes Across Various Global Economies using VSC®-8000/HS”, *International Journal For Multidisciplinary Research*, vol. 5, no. 5, Oct. 2023. https://doi.org/10.36948/ijfmr.2023.v05i05.7717

[15] J. Mutanen, T. Jaaskelainen, y J. P. S. Parkkinen, "Luminescent Security Properties of Banknotes", *Society for Imaging Science and Technology: Image Processing, Image Quality, Image Capture, Systems Conference*, pp. 421–424, 2003.

[16] E. Hecht, *Optics*, 5th ed. Pearson Education, 2017.

[17] W. D. Callister, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 10ma ed., Hoboken, NJ: Wiley, 2018.

[18] A. Aguirre-Flores, "Espectroscopía Uv-visible (Uv-Vis).", 2018. [En línea]. https://enengiedublog.wordpress.com/2018/01/29/espectroscopia-uv-visible-uv-vis/ [Ingresado el 14/08/2024].

[19] S. Kasap, *Principles of Electronic Materials and Devices*, 4ta ed., Columbus, OH: McGraw-Hill US Higher Ed USE, 2018.

[20] J. Jakob, "Polymeric Banknotes", Tesis para el grado de Bachiller en Ingeniería Informática, Tomas Bata University, Zlín, República Checa, 2019.

[21] S. Constantakis, Ed., "Fluorescence", *World of Forensic Science*, vol. 1. Farmington Hills, MI: Gale, pp. 307–308, 2016.

[22] R. Giri, P. Bhattarai, S. P. Chimouriya, and B. R. Ghimire, "Examination of Security Features in Nepali Currency of Denomination Rs. 500 and Rs. 1000 Using Video Spectral Comparator-6000", *Journal of Nepal Physical Society*, vol. 7, no. 4, pp. 36–42, Dec. 2021. https://doi.org/10.3126/jnphyssoc.v7i4.42929

[23] R. M. O. Mendoza, *Elementary Organic Spectroscopy*. Ashland: Arcler Press, 2019.

[24] S. Constantakis, Ed., "Spectroscopy", *World of Forensic Science*, vol. 2. Farmington Hills, MI: Gale, pp. 634–638, 2016.

[25] M. Hof y R. Macháň, "Basics of Optical Spectroscopy", *Handbook of Spectroscopy*, pp. 31–38, 2014.

[26] R Foundation for Statistical Computing, "R: A Language and Environment for Statistical Computing", v.4.4.1, Vienna, Austria, 2024.

[27] H. Wickham et al., "Welcome to the tidyverse", *Journal of Open Source Software*, vol. 4, no. 43, p. 1686, Nov. 2019. https://doi.org/10.21105/JOSS.01686

[28] P. J. Aphalo, "ggpmisc: Miscellaneous Extensions to 'ggplot2'", 2024.

[29] P. J. Aphalo, "The r4photobiology suite", *UV4Plants Bulletin*, vol. 2015, no. 1, pp. 21-29, 2015. https://doi.org/10.19232/uv4pb.2015.1.14

[30] C. Sievert, *Interactive Web-Based Data Visualization with R, plotly, and shiny*, Chapman and Hall/CRC, 2020.

[31] B. C. Smith, "The Infrared Spectra of Polymers III: Hydrocarbon Polymers", *Spectroscopy*, vol. 36, no. 11, pp. 22–25, 2021. https://doi.org/10.56530/spectroscopy.mh7872q7

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Creación de una herramienta digital sobre casos no contemplados en la regulación oficial relacionados a diversos trámites para el registro de productos de interés sanitario

Development of a digital tool to address unregulated cases in various procedures for the registration public health interest products

Noelia Arce-Rodríguez[1], Sianny Corrales-Montero[2], Jorge Andrés Pacheco-Molina[3], Juan José Mora-Román[4]

Fecha de recepción: 25 de marzo, 2025
Fecha de aprobación: 4 de septiembre, 2025

Arce-Rodríguez, N; Corrales-Montero, S; Pacheco-Molina, J.A; Mora-Román, J.J. Creación de una herramienta digital sobre casos no contemplados en la regulación oficial relacionados a diversos trámites para el registro de productos de interés sanitario. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 1. Enero-Marzo, 2026. Pág. 130-148.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i1.7859

1 Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
noelia.arcerodriguez@ucr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0002-6183-5891
2 Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
sianny.corrales.montero@gmail.com
https://orcid.org/0009-0006-8850-7894
3 Departamento de Farmacia Industrial, Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
jorge.pacheco@ucr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0003-4225-1839
4 Departamento de Farmacia Industrial, Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
juanjose.moraroman@ucr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0001-9148-3025

Palabras clave

Industria farmacéutica; asuntos regulatorios; acción correctiva; acción preventiva; inteligencia artificial; sistema basado en el conocimiento.

Resumen

El Departamento de Asuntos Regulatorios de una compañía farmacéutica debe estar en constante actualización, pues los requisitos regulatorios están evolucionando a nivel global. Una de las herramientas de las cuales dispone son las Acciones Preventivas y Acciones Correctivas (CAPAs, por sus siglas en inglés). Para implementar estos sistemas se dispone actualmente de la utilización de inteligencia artificial (IA). El objetivo de la presente investigación fue crear una herramienta digital para la recopilación de información histórica sobre casos no contemplados en la regulación oficial relacionada al sometimiento de trámites referentes a medicamentos de venta libre, cosméticos, dispositivos médicos y suplementos alimenticios en países de Centroamérica y El Caribe, así como Ecuador y Uruguay. Para llevarla a cabo, se desarrolló un sistema basado en el conocimiento (KBS, por sus siglas en inglés) mediante el uso de CAPAs, con información no contemplada en las regulaciones correspondientes. Este trabajo implicó recopilar la información histórica de las naciones de interés, categorizar la lista de prevenciones, separar los casos, revisar los resultados y unificar la información. Seguidamente, se diseñó la herramienta digital a través de Microsoft SharePoint®, con la consecuente migración de información. Finalmente, se validó el producto final y se capacitó al equipo de trabajo. Gracias a la labor efectuada, se diseñó una interfaz del usuario innovadora y eficiente, sin emplear herramientas más tradicionales. Adicionalmente, la validación de la base de conocimiento demostró ser una estrategia digital adecuada en cuanto a contenido, diseño y formato.

Keywords

Pharmaceutical industry; regulatory affairs; corrective action; preventive action; artificial intelligence; knowledge-based system.

Abstract

The results showed that all batches in the Regulatory Affairs Department of a pharmaceutical company must be constantly updated, as regulatory requirements are evolving globally. One of the tools available is Preventive Actions and Corrective Actions (CAPAs). Artificial intelligence (AI) is currently used to implement these systems. The objective of this research was to create a digital tool for the collection of historical information on cases not contemplated in the official regulation related to the submission of various procedures regarding over-the-counter medicines, cosmetics, medical devices, and food supplements in countries in Central America and the Caribbean, as well as Ecuador and Uruguay. To carry it out, a knowledge-based system (KBS) was developed employing CAPAs, with information not contemplated in the corresponding regulations. This work involved collecting historical information from the nations of interest, categorizing the list of preventions, separating the cases, reviewing the results, and unifying the information. The digital tool was then designed utilizing Microsoft SharePoint®, with the subsequent information migration. Finally, the final product was validated, and the work team was trained. Thanks to the work, an innovative and efficient user interface was designed without employing more traditional tools. Additionally, the validation of the knowledge base proved to be an appropriate digital strategy in terms of content, design, and format.

Introducción

La comercialización de productos de interés sanitario a nivel mundial depende del cumplimiento de una regulación para garantizar su calidad [1]. Dentro del proceso regulatorio existen varios trámites dependiendo de lo que las compañías deseen, tanto por regulación como por estrategias comerciales. Los principales, independientemente de su categoría, son registros nuevos, cambios post registro, renovaciones, notificaciones y consultas. Pueden ser aprobados, rechazados u observados (prevenidos) por parte de la autoridad correspondiente.

El Departamento de Asuntos Regulatorios de una compañía farmacéutica se encarga tanto de obtener como de mantener la aprobación del registro sanitario de las distintas categorías de sus productos. Su papel es esencial, puesto que, al aprobarse después de toda su evaluación, se está asegurando su calidad y seguridad para el paciente. Como complemento, los profesionales en farmacia deben estar en constante actualización, pues los requerimientos regulatorios están evolucionando a nivel global, representando un gran desafío, al afectar el procedimiento de aprobación [2].

Una de las herramientas de las cuales dispone son las Acciones Preventivas y Acciones Correctivas (CAPAs, por sus siglas en inglés). La Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA, por sus siglas en inglés) define un sistema CAPA como un sistema de acción preventiva y correctiva que recopila y analiza información, identifica e investiga problemas de calidad, y toma acciones preventivas y/o correctivas para prevenir su recurrencia [3]. La acción correctiva elimina la causa de una no conformidad detectada o una situación no deseada, mientras que la preventiva previene la ocurrencia de la no conformidad o situación [4].

Para implementarlos, se dispone de la utilización de la inteligencia artificial (IA), que es la habilidad que poseen los sistemas computarizados de realizar tareas que forman parte de la inteligencia humana, como el entendimiento, el aprendizaje y el pensamiento [5, 6]. Dentro de los sistemas computarizados se encuentran las bases de conocimiento, que representan el conocimiento de expertos y son empleados para la resolución de problemas del mundo real [7]. Su objetivo es brindar un repositorio centralizado de conocimientos, el cual debe ser accesible para todos los miembros de una organización. También permite la mejora en la toma de decisiones y, por ende, la resolución de problemas de manera eficiente. Igualmente, genera un aprendizaje continuo para quienes la apliquen [8].

Las bases de conocimiento poseen dos métodos de razonamiento para la toma de decisiones llamados Razonamiento Basado en Reglas (RBR, por sus siglas en inglés) y Razonamiento Basado en Casos (CBR, por sus siglas en inglés) [7]. El primero brinda conocimiento de una forma procedimental [9]. Es presentado en forma de reglas relacionadas con la descripción del problema y su conclusión. Sin embargo, debe existir una precondición que permita predecir una conclusión. Esto debe cumplirse para tomar una decisión o acción, lo cual lo hace muy restrictivo y difícilmente aplicable al mundo real [10].

Por su parte, el CBR comprende un principio basado en que los problemas se resuelven adaptando la solución a partir de situaciones similares del pasado [10, 11]. Cuando se identifica una problemática, el sistema CBR se direcciona a una respuesta de un problema ya existente y resuelto anteriormente [10].

Es fundamental reconocer que a nivel de asuntos regulatorios la IA posee un impacto relevante. No obstante, esta última se encuentra en etapas tempranas para este campo de la industria farmacéutica. Algunos autores afirman que para lograr que sea implementada se deben cumplir los desafíos de validación del software y su correspondiente evaluación en términos de

seguridad [5]. De esta forma, permitiría simplificar la complejidad de los procesos regulatorios, y automatizar el trabajo administrativo, las creaciones de dosieres, las auditorías y los sistemas de calidad [5, 12].

Existen herramientas tecnológicas usadas a lo largo de los años. Un ejemplo son los Programas de Sistemas de Análisis (SAP, por sus siglas en inglés), abarcando temas como logística, finanzas y planificación. Este tipo de software presenta ventajas dentro de las empresas farmacéuticas, tales como la eliminación de la sincronización de cambios en diferentes sistemas y la estandarización de la denominación de productos por codificación [13].

Siguiendo esta línea, Microsoft brinda opciones para las compañías. Una de ellas es SharePoint®, una plataforma colaborativa que permite crear intranets y sitios electrónicos. Además, dispone de condiciones para el almacenamiento, la organización y la puesta en común de información de forma corporativa [14]. Esta plataforma integra diversas aplicaciones como SharePoint Designer, Power Apps, Power Automate, Power BI, Microsoft Outlook, Microsoft Lists®, Microsoft Planner, Microsoft Teams, Service Now, entre otras [15].

Es de relevancia el conocimiento acerca de Microsoft Lists®, que puede ayudar a la optimización del trabajo. Brinda plantillas personalizables para la elaboración de listas que pueden ser compartidas y editadas en tiempo real [16]. Estas listas pueden incluir datos en forma de texto, tablero, calendario, número, fechas, archivos, entre otras. Dentro de su interfaz se visualiza la opción de emplear Power BI, un elemento diseñado para visualizar e integrar datos y crear reportes interactivos. Es un conjunto de servicios de software y aplicaciones para convertir datos no relacionados en información coherente. Esto brinda soluciones, al transformar datos en información gráfica [17].

Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue crear una herramienta digital para la provisión de información histórica sobre casos no contemplados en la regulación oficial relacionada al sometimiento de trámites varios referentes a medicamentos de venta libre, cosméticos, dispositivos médicos y suplementos alimenticios en países de Centroamérica y El Caribe, así como Ecuador y Uruguay.

Metodología

Para esta investigación se desarrolló e implementó un sistema basado en el conocimiento (KBS, por sus siglas en inglés) como herramienta digital, mediante el uso de sistemas CAPAs, con información no contemplada en las regulaciones correspondientes. Para esto, se detallaron casos con su respectiva acción preventiva o acción correctiva.

Recopilación de información histórica

Se recopilaron datos históricos sobre prevenciones emitidas por las autoridades reguladoras de Costa Rica, Belice, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Panamá, Aruba, Curazao, Jamaica, República Dominicana, Trinidad y Tobago, Ecuador y Uruguay durante el período comprendido entre junio de 2022 y diciembre de 2023. Esta búsqueda brindó las fechas de emisión de las prevenciones, lo que a su vez facilitó obtener el contenido de cada una de ellas junto con la respuesta dada por parte del Departamento de Asuntos Regulatorios. Se consideraron las prevenciones referentes a cualquier tipo de trámite (registro nuevo, cambio post registro, renovación, notificación, consulta).

Categorización de la lista de prevenciones

Una vez revisadas las prevenciones, se categorizaron en aquellas ligadas a un incumplimiento de la regulación y aquellas sin relación con la normativa. Esto permitió generar una lista de las que no estaban basadas en un incumplimiento de la regulación oficial, sino en criterios de evaluadores o en detalles específicos de cada estado. El listado se desarrolló mediante la herramienta Microsoft Excel®.

Separación en casos

La lista de prevenciones no contempladas en la regulación oficial se separó en aquellas que fuesen casos a los cuales se ligaron a acciones correctivas y los que pudieron evitarse con una acción preventiva.

Revisión de resultados anteriores y unificación de la información

Se revisó la información de la herramienta KBS antigua que poseía la empresa para unificarla y complementarla con la obtenida de las prevenciones. De esta manera, se obtuvo una lista detallada de casos no contemplados en la regulación durante el período establecido.

Diseño de la herramienta digital y migración de la información

Se utilizó el programa Microsoft SharePoint®, que a su vez permitió usar la aplicación Microsoft Lists® para la creación de columnas y establecer vistas personalizadas. Las listas generadas fueron: producto, categoría de producto, país, tipo de trámite, requisitos, archivos de conocimiento, caso-acción preventiva y caso-acción correctiva.

Para la lista de exigencias, se revisó la regulación perteneciente a cada categoría de producto para todos los tipos de trámite. De esta forma, se unificaron los requerimientos para decidir cuál información debía ser ingresada en esta lista.

Las listas principales fueron archivos de conocimiento, caso-acción preventiva y caso-acción correctiva, ya que contenían información de las otras. Cada vez que se ingresaba información a cualquier otra lista, estas tres se actualizaban automáticamente, porque los datos estaban interrelacionados. Es importante mencionar que la lista de archivos de conocimiento estaba ligada a la de requisitos. Al ingresar a esta última, se podía visualizar con cuál o cuáles archivos de conocimiento estaban ligados.

Para el formulario de caso-acción correctiva y caso-acción preventiva se decidió que la información que debía contener fuera la indicada en el cuadro 1.

Cuadro 1. Programación del formulario caso-acción correctiva y caso-acción preventiva en Microsoft Lists®.

Elemento del formulario	Tipo de información	Ingreso de información
Caso	Texto	Obligatorio
Resolución (acción correctiva o preventiva)	Texto	Obligatorio
Producto	Búsqueda de opción múltiple	No obligatorio
Aplicable a otros productos	Sí o no	Obligatorio
País	Búsqueda de opción múltiple	Obligatorio
Aplicable a otros países	Sí o no	Obligatorio
Requisitos	Búsqueda de opción múltiple	Obligatorio
Tipo de trámite	Búsqueda de opción múltiple	Obligatorio
Datos adjuntos	La herramienta permite anexar un documento en cualquier formato	No obligatorio

Para la lista de archivos de conocimiento, el formulario se programó de tal forma que se ingresara de manera obligatoria el “nombre” y el “enlace” del archivo en cuestión. Cuando el diseño estuvo concluido, se procedió a ingresar la información de cada una de las listas, así como los casos en cada uno de los formularios. Finalmente, se eligió la vista de “galería” para apreciar en la pantalla principal un resumen de ellos.

Validación de la herramienta y capacitación al equipo

Una vez creada la base de conocimiento, se sometió a un proceso de validación de contenido a través del juicio de expertos. Se trató de una opinión fundamentada por parte de individuos con experiencia y trayectoria en un campo específico, los cuales son capaces de dar información, evidencia y juicios acerca del tema en cuestión [18].

Los participantes fueron quienes conformaban el equipo de Asuntos Regulatorios de la compañía en Costa Rica y dos personas del Departamento de Operaciones Regulatorias basado en Colombia. Los criterios para su selección se basaron en la formación académica y experiencia dentro de la empresa. El propósito de esta acción fue emitir observaciones para corregir, reforzar, eliminar o agregar datos o, incluso programaciones, que permitieran la optimización de búsquedas.

Para llevarlo a cabo, se desarrolló un cuestionario con preguntas abiertas y cerradas para conocer la efectividad, tanto del contenido como del diseño de la herramienta (Figura 1). La escala de Likert se empleó para las preguntas cerradas con una valoración del 1 al 5, donde 1 representa total desacuerdo y 5 indica total acuerdo. Este cuestionario se aplicó en días diferentes para los dos equipos mencionados.

El siguiente cuestionario tiene como finalidad validar la Base de Conocimiento, la cual está diseñada para optimizar los procesos regulatorios. La primera parte está diseñada con base en el formato de Escala de Likert, donde los números representan lo siguiente:

1: totalmente en desacuerdo, 2: en desacuerdo, 3: neutral, 4: de acuerdo, 5: totalmente de acuerdo.

Marque la opción que desde su perspectiva evalúa el contenido de la interrogante.

La segunda parte contiene una pregunta abierta que trata de conocer el criterio, la opinión y las recomendaciones de cada participante para contribuir con el mejoramiento de la herramienta digital creada.

___ Miembro del Departamento de Operaciones Regulatorias.

___ Miembro del Departamento de Asuntos Regulatorios.

Primera parte

Pregunta	**Escala**				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
1. El diseño y formato de la Base de Conocimiento permite comprender la información.					
2. Los criterios de búsqueda de "requisito", "país" y "producto" son adecuados para encontrar la información.					
3. El tipo de información contenida más la actualización constante de la Base de Conocimiento permitirá optimizar los procesos regulatorios.					
4. La manera de ingresar información nueva es fácil y adecuada.					
5. El diseño utilizado es la opción visual más adecuada.					

Segunda parte

1. ¿Qué tipo de información agregaría o eliminaría de Base de Conocimiento? ¿Por qué?

Figura 1. Cuestionario aplicado al Departamento de Asuntos Regulatorios y al Departamento de Operaciones Regulatorias para validar la herramienta digital diseñada.

Por último, durante la presentación de la herramienta digital a los equipos se proporcionó una guía sobre cómo completar la información en cada formulario y lista de Microsoft Lists®. Este espacio también constituyó una sesión de capacitación.

Resultados

Identificación de lista detallada de casos no contemplados en la regulación oficial que hayan impactado el proceso de sometimiento de trámites en los países de Centroamérica, El Caribe, Ecuador y Uruguay, y sus correspondientes acciones correctivas y/o preventivas

Se analizó el contenido de 246 prevenciones emitidas por las autoridades reguladoras de los territorios señalados. El 51,22 % poseía contenido no contemplado dentro de las regulaciones, decretos o comunicados oficiales asociados a sus entidades. Estos datos permitieron obtener una lista de casos con contenido contemplado y no contemplado en la regulación, como se aprecia en el cuadro 2.

Cuadro 2. Cantidad de prevenciones con contenido contemplado y no contemplado en las regulaciones oficiales de los países de Centroamérica, El Caribe, Ecuador y Uruguay de junio de 2022 a diciembre de 2023, de acuerdo con la categoría de producto.

Categoría de producto	Prevenciones contempladas en la regulación	Prevenciones no contempladas en la regulación	Total
Cosméticos orales	40	57	97
Analgésicos	30	23	53
Medicamentos respiratorios	26	19	45
Suplementos vitamínicos	13	13	26
Medicamentos tópicos	4	11	15
Medicamentos gastrointestinales	7	3	10
Total	120	126	246

Al categorizar las 126 prevenciones en casos con su respectiva acción correctiva o acción preventiva, se obtuvieron 26 y 43 casos, respectivamente. Se debe considerar que la sumatoria no da 126, debido a que muchos de ellos se repitieron y fueron unificados.

Adicionalmente, al revisar información anterior que poseía la compañía, se consiguieron un caso y 55 casos, respectivamente. Por lo tanto, al unificar los datos con los obtenidos de las prevenciones, el total fue 27 casos con su correspondiente acción correctiva y 98 con su respectiva acción preventiva.

Para la lista de caso-resolución (acción correctiva) el requisito de etiquetas de empaques primarios y secundarios fue el que estaba relacionado a mayor cantidad de casos y acciones correctivas, seguido por la fórmula cuali-cuantitativa (FCC) y los estudios de estabilidad, como se muestra en la Figura 2. Por su parte, la metodología analítica y el Certificado de Buenas Prácticas de Manufactura (BPMs) tuvieron la misma cantidad de casos, al igual que las especificaciones de producto terminado, el material de empaque, las cartas de correspondencia, el Certificado de Libre Venta (CLV) y el Certificado Técnico Internacional (ITC, por sus siglas en inglés). El inserto, los contratos, el Certificado de Producto Farmacéutico (CPP, por sus siglas en inglés) y otros documentos legales en general estuvieron referidos únicamente a un caso. Los restantes elementos no estuvieron inmersos en ningún caso.

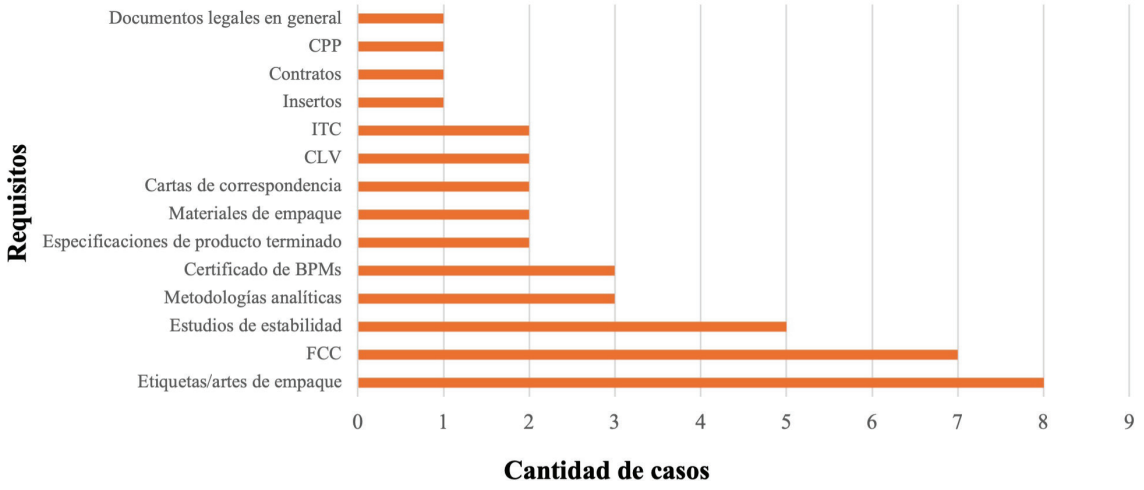


Figura 2. Cantidad de casos-acción correctiva no contemplados en las regulaciones oficiales de los diferentes países de acuerdo con los requisitos de cada trámite establecidos en dichas regulaciones.

Para la lista de caso-acción preventiva, las etiquetas/artes de empaques estuvieron relacionadas con 18 situaciones, seguidas de la FCC con 16, como se observa en la Figura 3. Las cartas de correspondencia y los plazos siguieron con 14 y 12 casos, respectivamente. Seguidamente, se encontraron los formularios, los distribuidores y el CPP. A continuación, aparecen aquellos referentes a BPMs, a la plataforma Regístrelo y a documentos legales en general. Los estudios de estabilidad y el CLV también presentaron casos.

La metodología analítica correspondió con cuatro casos, mientras que el certificado de análisis (CoA, por sus siglas en inglés), las especificaciones de producto terminado, la carta aclaratoria de nombre, las muestras y la declaración de filiales estuvieron relacionados con tres. Para el material de empaque y los informes periódicos de seguridad (PBRERs, por sus siglas en inglés) se hallaron dos casos. Finalmente, la monografía, los poderes, los contratos, el Portal web de Panamá y el ITC se refirieron con uno.

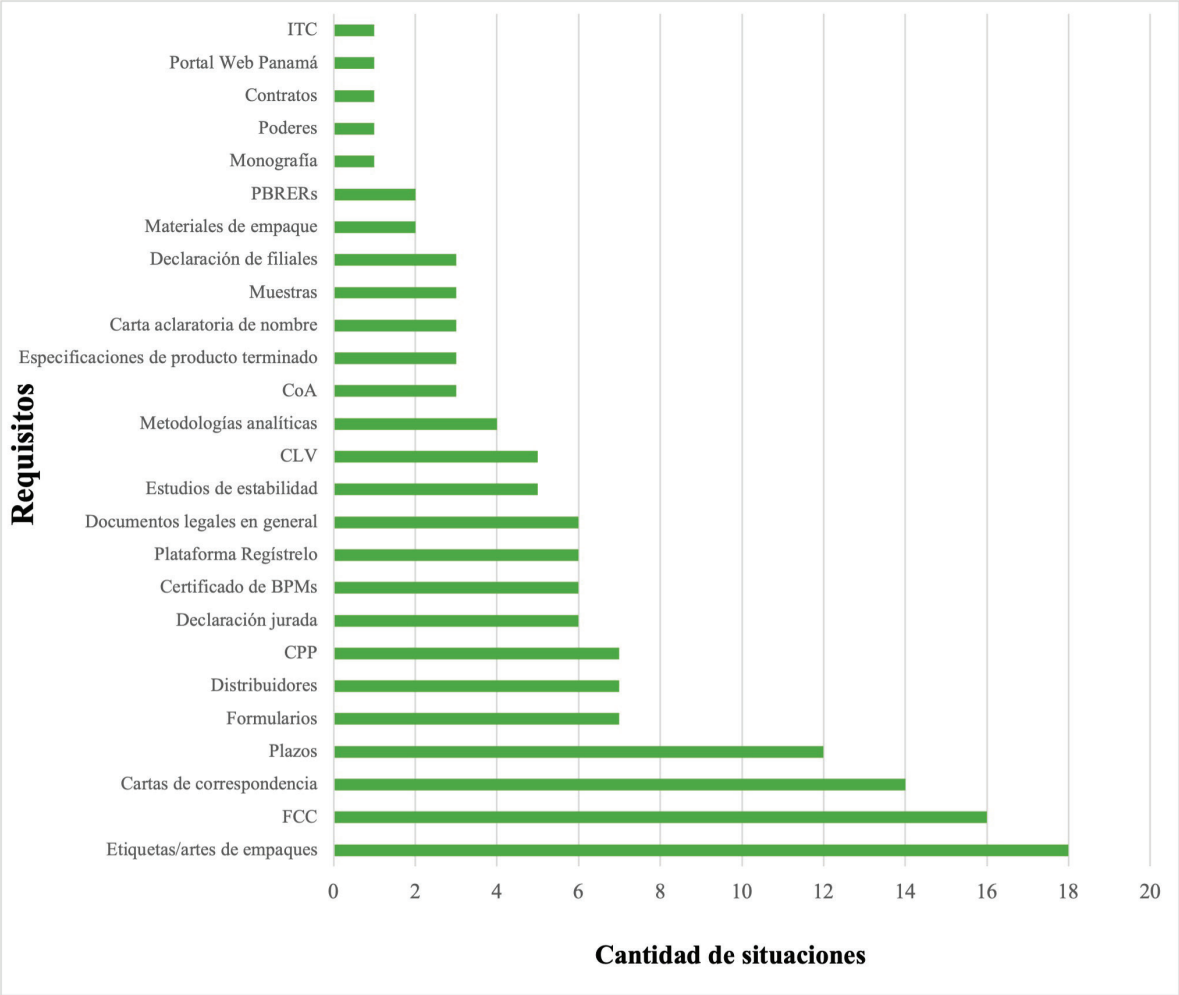


Figura 3. Cantidad de casos-acción preventiva no contemplados en las regulaciones oficiales de los diferentes países de acuerdo con los requisitos de cada trámite establecidos en dichas regulaciones.

Construcción de un diseño visual de la interfaz de usuario de la herramienta digital

En cuanto al diseño de la herramienta, se visualizó la interfaz principal con un total de ocho listas (Figura 4). Ellas fueron: caso-resolución (acción correctiva), caso-acción preventiva, archivos de conocimiento, requisitos, producto, categoría de producto, país y tipo de trámite. Se eligió un color y un ícono para cada una de ellas, estableciendo las tres primeras como principales. Todas podían ser actualizadas de manera constante e individual.

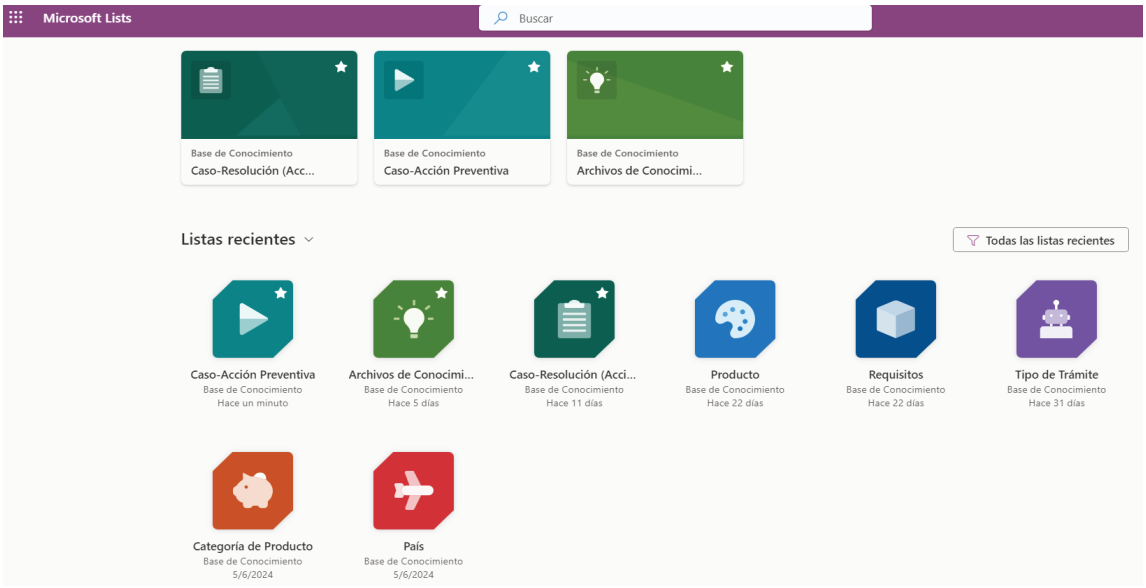


Figura 4. Interfaz principal de la herramienta digital diseñada utilizando Microsoft Lists®.

Clasificación de la información de la lista de casos no contemplados en la regulación oficial dentro de la herramienta digital diseñada

Para categorizar la información dentro de la herramienta digital, se consideró que las listas de caso-resolución (acción correctiva) y caso-acción preventiva se encontraban relacionadas con todas las demás, puesto que, para completar su información se necesitaban datos de los otros listados. Al agregar un nuevo caso se desplegaba un formulario en donde era imprescindible mencionar requisito (s), producto (s), país (es) y tipo de trámite, como se denota en la Figura 5.

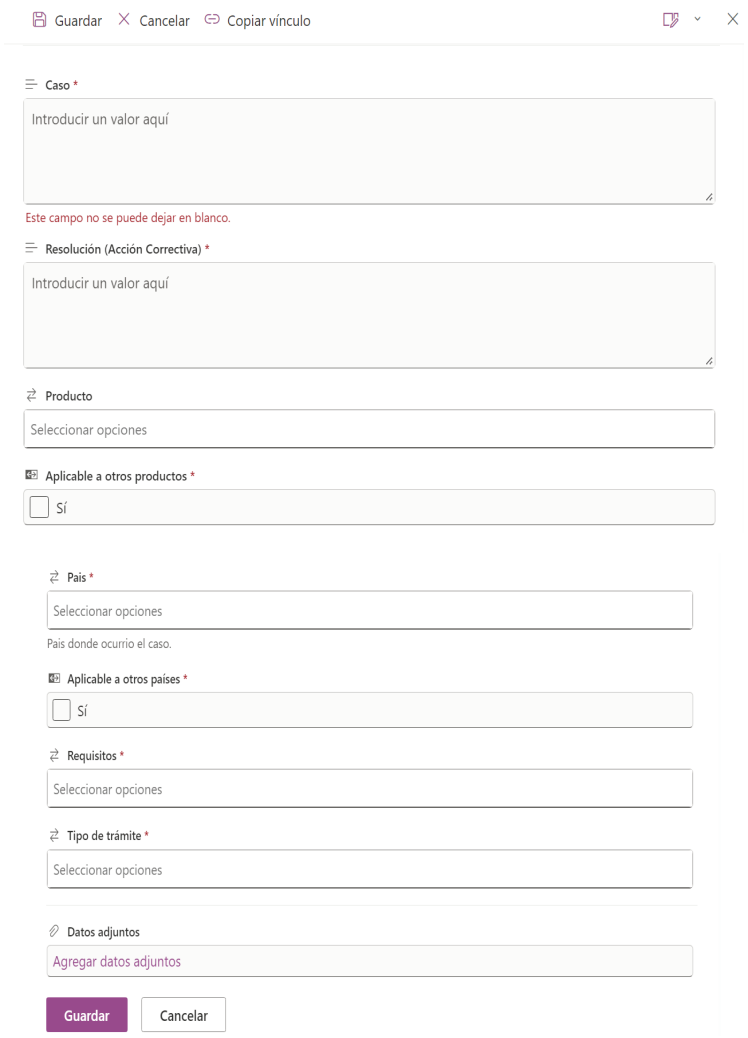


Figura 5. Formulario desplegado de la lista caso-resolución (acción correctiva) dentro de la herramienta digital diseñada.

El formulario de caso-acción preventiva es similar al de la Figura 5. El cambio es solamente la información de acción correctiva por la de acción preventiva.

Ambas listas poseían la opción de “datos adjuntos“, como se muestra en la Figura 6. Allí se puede adjuntar la respuesta del Departamento de Asuntos Regulatorios a la prevención a la cual hace referencia el caso.

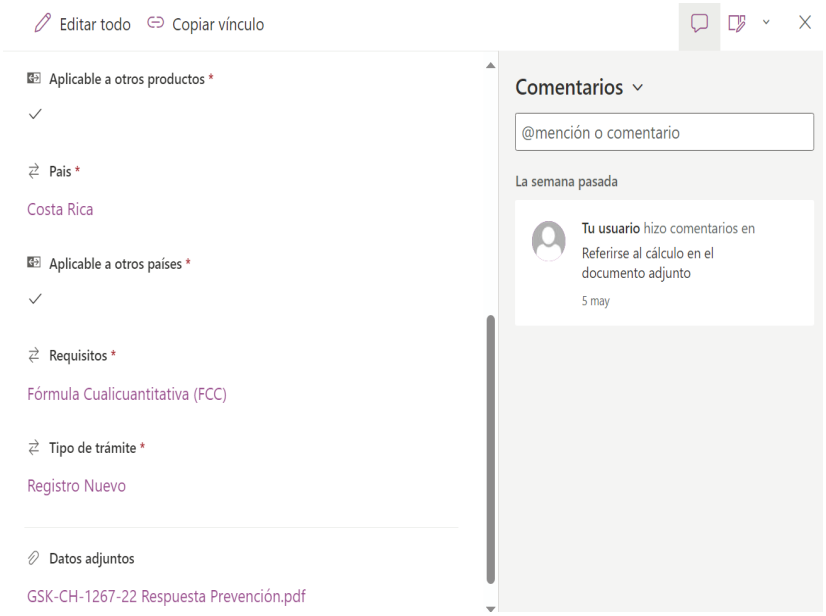


Figura 6. Visualización del formulario cuando hay un documento adjunto.

Una vez completados todos los formularios de caso-resolución (acción correctiva) y caso-acción preventiva correspondientes, la visualización de la información desde la vista de "galería" se muestra en la Figura 7. Se recalca que es posible crear vistas personalizadas. Para esta lista, se decidió ocultar cierta información para que cuando se muestre el caso de forma externa solo se contemple el resumen y el requerimiento.

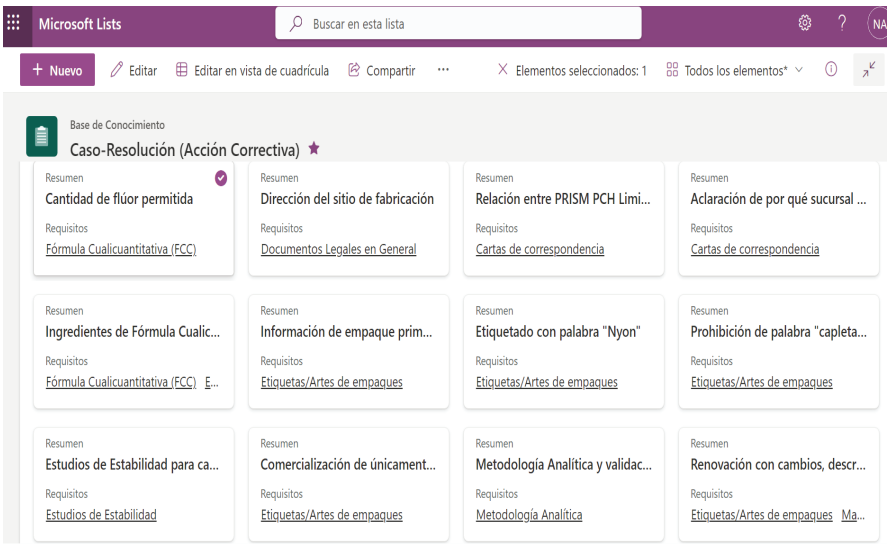


Figura 7. Vista de "galería" de la lista Caso-Resolución (Acción Correctiva) dentro de la herramienta digital.

Implementación en el uso de la herramienta digital diseñada en el Departamento de Asuntos Regulatorios de la compañía.

Con base en la información obtenida a través de la aplicación del cuestionario de validación facilitado al personal del Departamento de Asuntos Regulatorios y del Departamento Operaciones Regulatorias de la compañía se adquirieron los resultados documentados en los cuadros 3 y 4.

Cuadro 3. Resultados obtenidos a partir del cuestionario aplicado al personal del Departamento de Asuntos Regulatorios.

Persona	Pregunta				
	1	2	3	4	5
1	4	4	4	5	4
2	5	5	5	5	5
3	5	5	5	5	5
4	5	5	5	4	4
5	5	5	5	5	5
6	5	5	5	5	5
7	5	5	4	5	5
8	5	5	5	5	5
9	4	5	4	5	5
Promedio	4,8	4,9	4,7	4,9	4,8

En cuanto a la pregunta abierta, estas personas señalaron que es una herramienta muy útil, completa y amigable. En adición, mencionaron que con el paso del tiempo se sabría si falta o sobra información. Dentro de las recomendaciones comentaron incluir el código maestro de formulación (MFC, por sus siglas en inglés) a cada nombre de la lista de producto, porque puede tener la misma fórmula, pero diferente nombre comercial en cada nación de la región.

Cuadro 4. Resultados obtenidos a partir del cuestionario aplicado al personal del Departamento de Operaciones Regulatorias.

Persona	Pregunta				
	1	2	3	4	5
1	5	5	5	3	4
2	4	5	5	5	4
Promedio	4,5	5	5	4	4

En cuanto al segundo grupo, consideró que es una herramienta muy útil y valiosa. Asimismo, recomendaron medir si las resoluciones de las prevenciones fueron efectivas para obtener un único reporte en Power BI y dar mayor capacitación de cómo mantenerla a lo largo del tiempo.

Discusión

Identificación de una lista detallada de casos no contemplados en la regulación oficial que hayan impactado el proceso de sometimiento de trámites varios en los países de Centroamérica, El Caribe, Ecuador y Uruguay, y sus correspondientes resoluciones y acciones preventivas

El Departamento de Asuntos Regulatorios de la compañía farmacéutica se encarga del sometimiento de los trámites referentes a todas las categorías de productos ya descritas. En algunas ocasiones están ligadas a la criticidad de la persona evaluadora del momento, emitiendo comentarios no necesariamente relacionados a un incumplimiento de la regulación oficial.

Estos criterios pueden o no ser recurrentes para un país en específico. Por ende, es necesario disponer de medidas preventivas antes de ingresar un trámite, tomando en cuenta esta información para disminuir el riesgo de observaciones por parte de las autoridades reguladoras, o bien, medidas correctivas que permitan aplicar el método de CBR para resolver observaciones a futuro.

Al analizar cada una de las prevenciones emitidas por estas entidades en el período establecido, se determinó que más de la mitad contenía información no especificada en la regulación (51,22 %), como se observa en el cuadro 2, evidenciando la influencia de la subjetividad de las personas evaluadoras y el vacío de ciertos detalles en las regulaciones oficiales [19]. Adicionalmente, cada territorio cuenta con normativa propia que debe ser atendida, la cual no forma parte de las reglamentaciones asociadas a productos farmacéuticos y cosméticos, como se ha visualizado en investigaciones previas [20].

Aun cuando la mayoría de los estados involucrados se regulan bajo el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA), estos establecen las exigencias, más no cuestiones de formato o de la manera para enviar la información. Tal situación genera prevenciones frecuentes por parte de las autoridades reguladoras.

En contraposición, Belice, Aruba, Curazao y Haití son mercados parcialmente regulados. Esto significa que solamente ciertas categorías, como medicamentos, requieren de una inscripción sanitaria. Este trámite es gestionado como una notificación ante las autoridades de salud, por lo que la aplicación de acciones preventivas o correctivas son de baja probabilidad. Tal escenario proporciona mayor flexibilidad en la forma de enviar la información y es la razón por la cual ninguna acción correctiva, ni preventiva fue relacionada a alguna de estas naciones.

En el contexto de caso-resolución (acción correctiva), en la Figura 2 se muestra que el requerimiento de la regulación que estuvo ligado a mayor cantidad de casos por resolver era el de las etiquetas de empaques primarios y secundarios. Centroamérica emplea el RTCA 11.01.02:04 [21] y el RTCA 71.03.36:21 [22], mientras República Dominicana posee el Decreto No.246.06 [23].

En el RTCA 11.01.02:04 se establece que las formulaciones de venta libre deben cumplir con lo declarado en la información de los empaques primario y secundario, al igual que aquellos bajo receta médica, de acuerdo con su forma farmacéutica. Además, se deben agregar indicaciones, precauciones, contraindicaciones y dosis en el arte del inserto. Si no posee inserto, debe aparecer en el empaque secundario, y si no cuenta con este, en el primario [21].

Por otro lado, el RTCA 71.03.36:21 brinda los elementos mínimos de información requerida en los empaques de cosméticos [22]. De igual manera lo hace el Decreto No.246.06 [23].

A pesar de ello, si se adentra en cada uno de estos ocho casos, ninguno incumplió lo dispuesto en estos documentos. Las observaciones se respondieron señalándole al evaluador correspondiente que su argumento no procedía, pues la reglamentación no lo expresaba de esa manera. La resolución de estos casos conllevó la elaboración de cartas detalladas por parte del titular del producto en donde se refirió a cada aspecto de la regulación, haciendo constar que ninguno fue omitido.

En el caso de un cosmético, la autoridad reguladora indicó que todos los ingredientes de la FCC debían estar declarados en el empaque primario y secundario. Esta es la descripción completa de la composición y contenido de un medicamento o producto afín [24]. No obstante, se respondió acorde al inciso 6.1.f del RTCA 71.03.36:21, el cual establece que: "*La lista de ingredientes debe declararse en el etiquetado del envase primario o secundario, o bien en el etiquetado complementario, en nomenclatura INCI*" [22].

Si se analiza lo anterior, no es obligatorio indicar la lista en ambos empaques. Esto evidencia la interpretación de la persona evaluadora hacia la regulación, o una redacción inadecuada de la misma, al no ser más específica sobre que solamente uno de los empaques debe contener esta información.

Igualmente, se apreció que algunos requerimientos solamente se relacionaron a un caso, como documentos legales en general, CPP, contratos e insertos. Por ejemplo, una autoridad reguladora solicitó que se presentara un contrato de fabricación para una renovación, tal y como lo indica la regulación. Sin embargo, esto no aplicaba, ya que el fabricante y el titular eran filiales de la misma compañía y la elaboración de este documento no era posible. Esta situación no fue analizada por el evaluador al remitir la observación.

En adición, el RTCA únicamente especifica en cuáles tipos de trámites se pide un contrato y la información que debe contener, pero no el formato en el que debe desarrollarse, ni sus excepciones. Para el caso de la renovación se menciona que se debe presentar el contrato de fabricación o un extracto cuando aplique [25], dejando a criterio de la persona evaluadora el "cuando aplique".

En el contexto de las acciones preventivas necesarias para disminuir el riesgo de prevenciones a futuro, la Figura 3 muestra que al igual que los casos con acciones correctivas, el requisito de etiquetas de empaques primarios y secundarios fue el relacionado a mayor cantidad de situaciones (18 casos). Las acciones preventivas se basaron en la manera de presentar estos artes en los diversos territorios, de acuerdo con sus presentaciones comerciales. Cabe resaltar que, en cuestión de forma y formato, la regulación únicamente indica que deben ser legibles [21, 22].

Construcción de un diseño visual de la interfaz de usuario de la herramienta digital

En cuanto al diseño de la interfaz visual de la base de conocimiento usando Microsoft Lists® de Microsoft SharePoint®, según se muestra en la Figura 4, es posible indicar que muchos usuarios pueden editarla en tiempo real y simultáneamente sin problema alguno, lo que conlleva una mayor productividad. Además, existen permisos personalizados que limitan el acceso de información a un departamento en cuestión, pudiendo agregar otro miembro cuando se exija. Como complemento, como Microsoft SharePoint® está integrado a otras aplicaciones que emplea la compañía farmacéutica donde se desarrolló la investigación, unifica el flujo de trabajo, la edición y la comunicación [14, 15].

Clasificación de la información de la lista de casos no contemplados en la regulación oficial dentro de la herramienta digital diseñada

La creación de un formulario que debe ser completado para ingresar la información y la exigencia de datos obligatorios en determinadas casillas asegura que no haya ausencia de lo solicitado y que se bloquee la opción de ingresar nueva información si no se completó de forma adecuada, como se muestra en la Figura 5. Adicionalmente, al poseer la opción de ingresar documentos adjuntos, puede utilizarse a modo de consulta, ahorrando tiempo de búsqueda en el archivo digital de la empresa, con la obtención del documento digital referente al caso. Cabe mencionar que si hay información muy detallada en las prevenciones (como un cálculo), se puede colocar el documento adjunto y en el comentario señalar que debe referirse a este (Figura 6). De la misma forma, con la vista de "galería" (Figura 7) se aprecia que la herramienta digital facilita otras opciones visuales a gusto del usuario, lo que la hace muy versátil.

Siguiendo esta línea, la información ingresada puede ser exportada en un archivo de Microsoft Excel®, ser integrada a una base de datos e incluso crear una aplicación a partir de ella. Para esta última posibilidad, es indispensable un ingeniero en sistemas o una persona experta en análisis de datos.

Otro beneficio de Microsoft Lists® como opción de diseño y formato para crear la base de conocimiento es que posee Power BI. Este crea reportes en tiempo real del análisis de los datos e incluso anticipa tendencias y comportamientos [17]. Tal situación es valiosa para el Departamento de Asuntos Regulatorios, porque reduce la carga de generar reportes manuales y establece gráficos de la forma en que se necesite. En el caso del presente trabajo, Power BI puede crear gráficos relacionando todas las listas con todas las combinaciones posibles, es decir, casos con requisito, casos con producto, casos con país, entre otros.

Es importante hacer mención que con esta estrategia digital se pueden detallar los casos resueltos y visualizar la persona que ingresó la información para hacerle preguntas en caso de dudas. No obstante, es apropiado que el Departamento de Asuntos Regulatorios de la compañía la actualice constantemente, puesto que las regulaciones cambian [26].

Implementación en el uso de la herramienta digital diseñada en el Departamento de Asuntos Regulatorios de la compañía

Con respecto a la validación de la herramienta, acorde a los cuadros 3 y 4, los nueve miembros seleccionados del Departamento de Asuntos Regulatorios indicaron estar de acuerdo o totalmente de acuerdo con que el diseño y formato de la herramienta permitió comprender la información, equivalente en promedio a un 4,8. Además, consideraron que los criterios de búsqueda son adecuados y que el diseño era la opción visual más adecuada.

Para el caso del ingreso de información, los miembros señalaron que el formulario era una herramienta adecuada (4,9 en promedio). Estas respuestas evidenciaron que la interfaz visual creada haciendo uso de Microsoft Lists® fue apropiada y útil, a pesar de no ser una herramienta usada anteriormente por el departamento.

Con respecto a su uso, seis personas indicaron estar totalmente de acuerdo con que la misma permitirá optimizar los procedimientos regulatorios, mientras que tres estuvieron de acuerdo. Tales apreciaciones muestran lo positivo de su utilización.

En el caso del Departamento de Operaciones Regulatorias (cuadro 4), los miembros validaron en un 100 % los criterios de búsqueda y que la información contenida permitiría optimizar los procesos regulatorios (Figura 1). Para el diseño y formato, un miembro mencionó estar de acuerdo y otro estar totalmente de acuerdo con el mismo, equivalente a un 4,5. Para el ingreso de la información y si la opción visual era la adecuada, se obtuvo un valor de 4 en ambos casos. De esta manera, la herramienta digital se encuentra validada por parte de ambos departamentos, al obtener 80 % o más en cada una de las preguntas realizadas.

Lo anterior se debe a que cada respuesta posee un valor que permite obtener una puntuación total empleando la medición tipo ordinal [27]. Se considera realmente fiable y viable con un valor igual o mayor a 0,8 (80 %) [28, 29].

Luego de toda la labor llevada a cabo, uno de los beneficios percibidos sobre la elaboración de una base de conocimiento que contenga este tipo de información mediante sistemas CAPAs es resolver casos de forma similar a como se resolvieron en el pasado (método CBR) y prevenir el riesgo de observaciones por parte de las autoridades reguladoras, estableciendo medidas previas al sometimiento de un trámite. Así, es posible saber a cuál requerimiento de la regulación

se le debe prestar mayor atención y tomar las medidas necesarias. Asimismo, los sistemas CAPAs brindan sostenibilidad a largo plazo en el departamento y registran detalladamente las acciones tomadas para evidenciar la trazabilidad [30, 31].

Otro elemento es que la consulta de la herramienta permite conseguir conocimiento de todo tipo de producto, trámite y país, pues no está limitada a cierta información. Lo único que debe cumplirse es que sean datos no contemplados en alguna normativa.

Aún con las ventajas descritas anteriormente, esta estrategia posee dificultades de empleabilidad. Al no haberse obtenido una evaluación de tendencias de las prevenciones dentro de los resultados, existe la posibilidad de que alguna acción preventiva agregada se haya basado en la interpretación de un único evaluador. La tendencia es aquella inclinación hacia cierta dirección [32], por lo que en estos términos se refiere a que la mayoría de ellas no tendrán similitud. De esta forma, se debe tomar en cuenta que una medida preventiva no necesariamente va a asegurar la aprobación del trámite y podría verse como un trabajo adicional.

Para finalizar, un detalle fundamental es que los reglamentos y las regulaciones cambian frecuentemente [33, 34], por lo que mantener la herramienta actualizada puede ser un desafío constante que requiere tiempo. Aunado a ello, puede enfrentar resistencia por parte de un determinado equipo, debido a que puede suceder que estén acostumbrados a métodos más tradicionales de gestión de información. Otro detalle comprende la efectividad. Su evaluación podrá darse hasta tiempo después de haberse implementado.

Conclusiones

A partir de la investigación efectuada se determinó que el 51,22 % de las prevenciones analizadas entre junio de 2022 y diciembre de 2023 no estaban relacionadas a algún incumplimiento de la regulación oficial, mientras el 48,78 % sí lo estaban. La exigencia de la regulación que se relacionó a mayor cantidad de casos fue el de etiquetas de empaques.

Gracias al software SharePoint® se logró conocer sus aplicaciones, particularmente Microsoft Lists®. A través de su estudio se diseñó una interfaz del usuario innovadora y eficiente, sin considerar herramientas más tradicionales. La categorización de la información disponible por parte de la empresa farmacéutica en las distintas listas facultó crear un formulario para ingresar los datos, de forma tal que no fuera posible dejar espacios en blanco para la adición de información requerida.

Finalmente, su validación demostró que fue una estrategia digital adecuada en cuanto a contenido, diseño y formato. Algunas oportunidades de mejora incluyeron la colocación del MFC de cada uno de los productos, la capacitación de cómo mantener la herramienta a lo largo del tiempo y la medición de la efectividad de la respuesta.

Referencias

[1] O. Chisholm and H. Critchley, “Future directions in regulatory affairs,” *Front Med*, vol. 9, 1082384, 2023.

[2] B. J. Kumar, “Overview of Drug Regulatory Affairs and Regulatory Profession,” *International Journal of Drug Regulatory Affairs*, vol. 1, no. 1, pp. 1-4, 2013.

[3] United States Food & Drug Administration. (2023). *Corrective and Preventive Actions (CAPA)* [Online]. Disponible: https://www.fda.gov/inspections-compliance-enforcement-and-criminal-investigations/inspection-guides/corrective-and-preventive-actions-capa

[4] International Organization for Standardization, *Quality management systems – Fundamentals and vocabulary*, 4th ed. Geneva: International Organization for Standardization, 2015.

[5] R. S. Patil, S. B. Kulkarni, and V. L. Gaikwad, “Artificial intelligence in pharmaceutical regulatory affairs,” *Drug Discov Today*, vol. 28, no. 9, 103700, 2023.

[6] M. D. Ortega Urbano, "La farmacia en la nueva era de la inteligencia artificial: La farmacia y la inteligencia artificial," *Rev Int Tecnol Cienc Soc*, vol. 13, no. 3, pp. 1-11, 2023.

[7] A. S. Jadhav and R. M. Sonar, "Framework for evaluation and selection of the software packages: A hybrid knowledge based system approach," *J Syst Softw*, vol. 84, no. 8, pp. 1394-1407, 2011.

[8] C. Wei, "The Knowing Organization: How Organizations Use Information to Construct Meaning, Create Knowledge and Make Decisions," *Int J Inf Manag*, vol. 16, no. 5, pp. 329-340.

[9] J. Choobineh and A. W. Lo, "Should Rule-Based Reasoning Be Enhanced by Case-Based Reasoning for Conceptual Database Design? A Theory and an Experiment," *J Comput Inf Syst*, vol. 46, no. 2, pp. 66-77, 2005.

[10] K. Pal and J. A. Campbell, "An Application of Rule-Based and Case-Based Reasoning within a Single Legal Knowledge-Based System," *Data Base Adv Inf Syst*, vol. 28, no. 4, pp. 48-63, 1997.

[11] P. Berka, "Sentiment analysis using rule-based and case-based reasoning," *J Intell Inf Syst*, vol. 55, pp. 51-66, 2020.

[12] A. Rivare, "Artificial intelligence and digitalization in pharmaceutical regulatory affairs," thesis, Faculty of Pharmacy, Helsinki Univ., Helsinki, 2023.

[13] F. Cvetanovski and R. Zareski, "Regulatory Affairs in the pharmaceutical industry – insights," *Maced Pharm Bull*, vol. 66, no. 2, pp. 41-52, 2020.

[14] L. S. J. Weldon, "Knowledge Sharing Through MS SharePoint," *Collaborative Librarianship*, vol. 4, no. 1, 4, 2012.

[15] L. A. Ennis and R. S. Tims, "Harnessing the power of SharePoint for library applications," *Computers in Libraries*, vol. 30, 5, 2010.

[16] Microsoft. (2025). *Microsoft Lists* [Online]. Disponible: https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/microsoft-lists

[17] J. L. Vizuete Chancay y M. A. Bolaños, "Uso de Power BI en la toma de decisiones empresariales," *Revista Latinoamericana de Investigación Social*, vol. 7, no. 1, pp. 1-25, 2024.

[18] J. Escobar-Pérez y A. Cuervo-Martínez, "Validez de Contenido y Juicio de Expertos: Una Aproximación a su Utilización," *Avances en Medición*, vol. 6, pp. 27-36, 2008.

[19] E. Alonso, *Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2017: Mejora regulatoria y simplificación de trámites en Costa Rica*. San José: Programa Estado de la Nación, 2017.

[20] G. Ramírez Ramírez, M. Madrigal de la Selva, J. A. Pacheco Molina, et al., "Revisión de requisitos para el registro sanitario de medicamentos según el RTCA 11.03.59.18," *ConSciencia Sanitaria*, vol. 3, no. 1, pp. 92-106, 2024.

[21] Consejo de Ministros de Integración Económica Centroamericana, *RTCA 11.01.02:04 Productos Farmacéuticos. Etiquetado de Productos Farmacéuticos para Uso Humano*. San Salvador: Consejo de Ministros de Integración Económica Centroamericana, 2014.

[22] Consejo de Ministros de Integración Económica Centroamericana, *RTCA 71.03.36:21 Productos Cosméticos. Etiquetado de Productos Cosméticos*. San Salvador: Consejo de Ministros de Integración Económica Centroamericana, 2023.

[23] Presidencia de la República Dominicana, *Decreto No. 246-06*. Santo Domingo: República Dominicana, 2006.

[24] Consejo de Ministros de Integración Económica Centroamericana, *RTCA 65.05.51:08 Medicamentos Veterinarios y Productos Afines. Requisitos de Registro Sanitario y Control*. San Salvador: Consejo de Ministros de Integración Económica Centroamericana, 2010.

[25] Consejo de Ministros de Integración Económica Centroamericana, *RTCA 11.03.59:18 Productos Farmacéuticos. Medicamentos para Uso Humano. Requisitos de Registro Sanitario*. San Salvador: Consejo de Ministros de Integración Económica Centroamericana, 2021.

[26] J. R. Maza Castañeda, "Desarrollo del ejercicio profesional en el Área de Asuntos Regulatorios e Investigación en empresas privadas, durante el periodo 2014 al 2022," trabajo de suficiencia profesional, Facultad de Farmacia y Bioquímica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, 2023.

[27] C. A. Bedoya Laguna, "Diseño de un instrumento tipo escala Likert para la descripción de las actitudes hacia la tecnología por parte de los profesores de un colegio público de Bogotá," tesis de maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, 2017.

[28] J. Rodríguez-Rodríguez y M. Reguant-Álvarez, "Calcular la fiabilidad de un cuestionario o escala mediante el SPSS: el coeficiente alfa de Cronbach," *Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, vol. 13, no. 2, pp. 1-13, 2020.

[29] H. C. Oviedo y A. Campo-Arias, "Aproximación al uso de coeficiente alfa de Cronbach," *Rev Colomb Psiquiatr*, vol. 34, no. 4, pp. 572-580, 2005.

[30] C. P. Ajit, A. M. Bhagwat, and A. P. Chaudhari, "CAPA: An important concept of Quality Assurance in Pharmaceutical Industry*," Asian J Res Chem*, vol. 14, no. 5, pp. 357-362, 2021.

[31] P. Raghu, J. Vikas, H. V. Gangadharappa, et al., "CAPA in Pharmaceutical Industry," *Int J Pharm Res*, vol.13, no. 3, 33, 2021.

[32] Real Academia Española. (2024). *Tendencia* [En línea]. Disponible: https://dle.rae.es/tendencia

[33] B. Murillo Salinas, "Desarrollo del ejercicio profesional en el área de asuntos regulatorios en una droguería de origen extranjero, durante el periodo 2015 al 2022," trabajo de suficiencia profesional, Facultad de Farmacia y Bioquímica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, 2023.

[34] D. A. Ochoa Herrera, J. A. Moreno Vélez y S. A. Ruiz Saldarriaga, "Identificación y presentación de propuesta de cambios normativos entre informes OMS 32 y OMS 45 para la fabricación de medicamentos estériles en el laboratorio Corpaul," trabajo de grado, Corporación Universitaria Minuto de Dios, Antioquia, 2023.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Diseño de un circuito de mitigación para mejorar la conmutación de MOSFETs en una configuración de medio puente H

Design of a mitigation circuit to improve MOSFET switching in a half-bridge configuration

Giancarlo Alvarado-Rivera[1], Ana Rebeca Fonseca-Huapaya[2], Yeiner Arias-Esquivel[3]

Fecha de recepción: 24 de marzo, 2025
Fecha de aprobación: 13 de julio, 2025

Alvarado-Rivera, G; Fonseca-Huapaya, A.R; Arias-Esquivel, Y. Diseño de un circuito de mitigación para mejorar la conmutación de MOSFETs en una configuración de medio puente H. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 1. Enero-Marzo, 2026. Pág. 149-159.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i1.7858

1 Escuela de Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
giank1221@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0006-9058-2359
2 Escuela de Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
rebecafon@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0007-9180-6673
3 Escuela de Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
yarias@itcr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0002-5340-3933

Palabras clave

Capacitancia de Miller; conmutación; MOSFET; oscilación; medio puente H.

Resumen

Este trabajo aborda el diseño de un circuito para minimizar los efectos adversos en la conmutación de MOSFETs en un medio puente H. Los MOSFETs enfrentan problemas de eficiencia y estabilidad debido a capacitancias e inductancias parásitas. Para solucionar esto, se añadieron resistencias en gate-on y gate-off, así como un capacitor entre la puerta y la fuente. Estas modificaciones demostraron eficacia en simulaciones y pruebas experimentales, reduciendo perturbaciones y picos de tensión, y mejorando la estabilidad del sistema. La solución propuesta optimiza el rendimiento de los MOSFETs en aplicaciones de alta frecuencia y potencia, mejorando la eficiencia energética y reduciendo el estrés en los componentes.

Keywords

Commutation; Half-bridge; Miller inductance; MOSFET, oscillation.

Abstract

This work addresses the design of a circuit to minimize the adverse effects of MOSFET switching in a half-bridge configuration. MOSFETs suffer from efficiency and stability issues due to parasitic capacitances and inductances. To mitigate these effects, gate-on and gate-off resistors were added, along with a capacitor between the gate and source. These modifications proved effective in simulations and experimental tests, reducing disturbances and voltage spikes while improving system stability. The proposed solution enhances the performance of MOSFETs in high-frequency and high-power applications, increasing energy efficiency and reducing component stress.

Introducción

Un convertidor modular multinivel (MMC por sus siglas en inglés) es una topología de convertidores de potencia típicamente utilizado en aplicaciones de transmisión de energía en corriente continua de alta tensión y que recientemente se ha extendió al accionamiento de motores de media tensión. [1, 2]. Su diseño se basa en la interconexión de múltiples submódulos compuestos de medios puntos o puentes completos (ver Figura 1) que permiten la generación de una onda de tensión multinivel, lo que contribuye a mejorar la calidad de la energía y la eficiencia del sistema [3, 4].

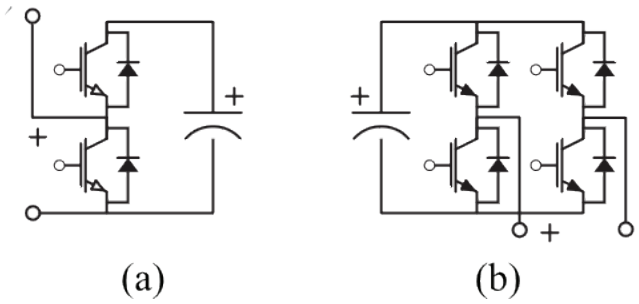


Figura 1. Submódulos de MMC. (a) Medio puente H. (b) Puente completo.

Un transistor de efecto de campo de semiconductores de óxido metálico (MOSFET por sus siglas en inglés) es un componente esencial en la implementación de convertidores multinivel. Son utilizados principalmente en aplicaciones de conmutación y amplificación debido a su alta eficiencia y velocidad [5]. Uno de los problemas observados en la configuración de medio puente H fue la presencia de oscilaciones en la señal de salida de ambos transistores, principalmente durante la activación del transistor. Este fenómeno se observa en la Figura 2, mediante la visualización de la tensión de puerta-fuente (V_{gs}) al activar y desactivar el dispositivo tras un período de tiempo muerto, donde las líneas son la tensión V_{gs} de los transistores superior e inferior de la configuración medio puente H mostrados en la Figura 1 respectivamente.

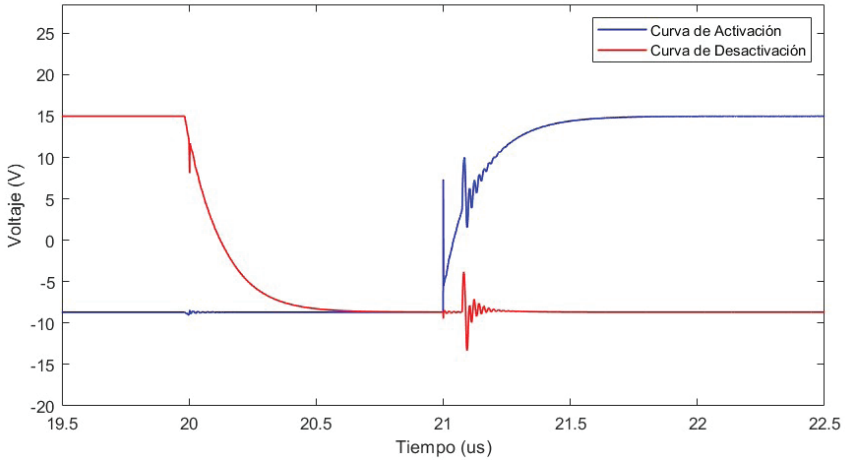


Figura 2. Señales de la tensión V_{gs} de un circuito medio puente H.

Dentro del funcionamiento de los MOSFETs la eficiencia de conmutación es un factor clave que influye directamente en el rendimiento y la fiabilidad de los circuitos electrónicos. A diferencia de los MOSFETs convencionales, los de potencia están diseñados para soportar altas tensiones y corrientes, lo que implica un manejo significativo de las capacitancias parásitas. Estas capacitancias incluyen: puerta a drenador (C_{gd}), puerta a fuente (C_{gs}) y drenador a fuente (C_{ds}) [6]. Sin embargo, estas capacitancias afectan negativamente la velocidad de conmutación del MOSFET, lo que resulta en tiempos de transición más largos y mayores pérdidas de energía durante el proceso de conmutación [7]. Una conmutación eficiente es fundamental para minimizar las pérdidas de energía y reducir el calentamiento, lo que resulta crucial en el diseño de sistemas de alta densidad de potencia y bajo consumo energético [8].

Se deben tener en cuenta los efectos parásitos que se presentan en los componentes, estos efectos son el resultado de las inductancias y capacitancias inherentes a los componentes y al diseño del circuito. La rápida conmutación de los transistores genera variaciones bruscas de corriente y tensión en el circuito, ante las cuales las inductancias y capacitancias parásitas presentes se oponen [9, 10].

Uno de los efectos parásitos más relevantes es la capacitancia de Miller, la cual surge debido al solapamiento entre la metalización de la puerta y la región n-menos del MOSFET, ubicada entre el drenador, la fuente y la puerta. La corriente a través de esta capacitancia se explica por la densidad de corriente de desplazamiento en el dieléctrico [11]. Durante el proceso de apagado, la región de deriva puede modelarse de manera unidimensional, y la intensidad del campo eléctrico en la capa de óxido es igual al pico del campo en la región de carga espacial.

Las posibles soluciones ante las pérdidas asociadas a la conmutación pueden variar según la causa analizada. En [12] se estudian los efectos de las cargas no lineales asociadas a corrientes parásitas en la conmutación de un dispositivo MOSFET en configuración medio puente H. En dicho estudio se caracteriza dicha carga parásita como una carga de saturación que queda en el transistor durante el periodo de apague del interruptor, por lo que se aplica un circuito de desaturación de pulso activo, en el cual se aplica una tensión muy pequeña en la fuente del transistor para eliminar el problema.

Para el estudio de los efectos adversos en la conmutación, se implementó una sección del circuito del medio puente H (ver Figura 3) en el simulador LTspice. Este simulador permite la evaluación detallada de componentes, considerando tanto sus aspectos teóricos como prácticos, y simula de manera precisa su funcionamiento en condiciones reales. Para la simulación, se empleó el modelo de MOSFET IRF300P227 el cual trabaja en un rango de 300 V entre el drenador y la fuente (V_{ds}).

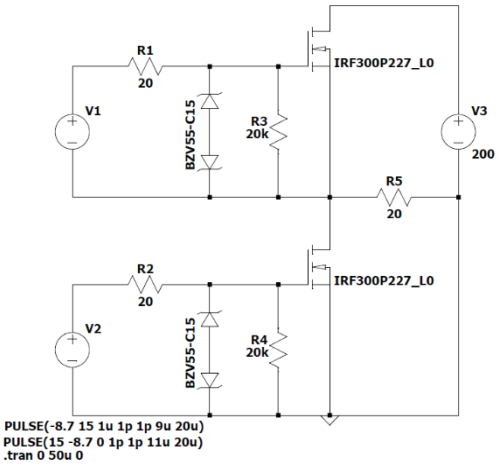


Figura 3. Simulación del circuito medio puente H.

Diseño del circuito para la mitigación de las oscilaciones de tensión entre la puerta del transistor

Para mitigar las oscilaciones de tensión en la tensión V_{gs} de los transistores, se desarrolló un circuito (ver Figura 4) capaz de minimizar las perturbaciones y picos de tensión que pueden ocurrir durante la conmutación de los MOSFETs en un circuito. Este tipo de circuito puede llegar a ser esencial para mejorar la estabilidad y eficiencia del sistema, especialmente en aplicaciones de alta frecuencia y potencia.

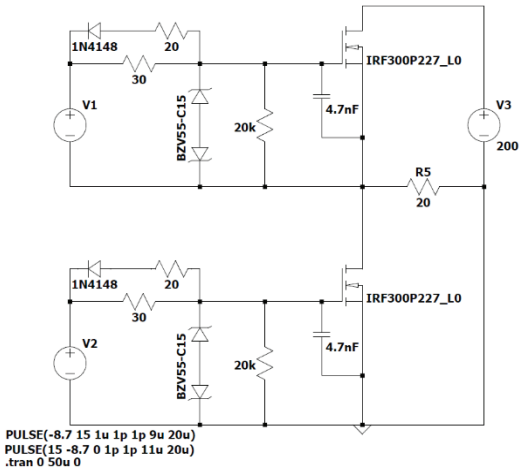


Figura 4. Circuito para la reducción de los efectos adversos de la conmutación de MOSFETs en medio puente H.

Durante el proceso de conmutación, se debe considerar el efecto de las capacitancias internas del transistor, donde las capacitancias C_{gd} y C_{gs} no son valores constantes, sino que varían de acuerdo con la tensión que atraviesa porque parte de la capacitancia es aportada por la capa de agotamiento [13]. C_{gd} conocida como capacitancia de realimentación o de Miller y la cual contribuye a las oscilaciones cuando el MOSFET cambia de estado. Luego está C_{gs} la cual controla la velocidad a la que se carga la puerta durante el encendido. La capacitancia total de la puerta, que controla tanto los tiempos de encendido como de apagado, es la suma de estas dos capacitancias [14, 15], como se muestra en la ecuación 1:

$$C_{iss} = C_{gd} + C_{gs} \tag{1}$$

El tiempo para la descarga o carga de un MOSFET durante la conmutación va a depender de la constante de tiempo τ definida en la ecuación 2. Esta constante se aplica tanto para los tiempos de encendido como de apagado del transistor, la única diferencia radica en el valor de la resistencia en la puerta (R_g), ya sea gate-on o gate-off. Para la resistencia de carga (gate-on), un valor más alto disminuye la velocidad de carga, lo que reduce la corriente que fluye a través de la resistencia [16].

$$\tau = R_g \cdot C_{iss} \tag{2}$$

La ecuación que describe el comportamiento de la tensión en la puerta del transistor durante la conmutación se deriva del modelo de un circuito RC en carga [15]. En este caso, la capacitancia se carga a través de la resistencia de la puerta R_g, tal como se expresa en la ecuación 3. La tensión en la puerta sigue una curva exponencial conforme se carga la capacitancia, y este tiempo está directamente relacionado con la constante de tiempo τ. Por lo tanto, al aumentar R_g, incrementa el tiempo que tarda en cargarse la puerta.

La tensión V_{ds} está relacionada con el comportamiento de la tensión V_{gs}, y varía a medida que se carga. Cuando esta tensión alcanza el umbral (V_{th}) para que el transitor conduzca, V_{ds} disminuye, permitiendo que la corriente fluya a través de las terminales del MOSFET.

$$V_{gs} = R_g C_{gd} \frac{dV_{ds}}{dt}\left(1 - e^{\frac{-t}{R_g(C_{gd}+C_{gs})}}\right) \tag{3}$$

Implementación en la plataforma de simulación

A partir del diseño mencionado anteriormente (Figura 4), se realizó la implementación de los métodos por separado para una mejor visualización de sus efectos individuales. En la Figura 5 se muestran ambas tensiones de V_{gs} en un circuito de medio puente H, específicamente al incorporar resistencias de gate-off y un diodo en la terminal de la puerta de los MOSFET. Durante el encendido del MOSFET, la curva de tensión V_{gs} muestra un rápido ascenso, indicando que el dispositivo está siendo llevado rápidamente hacía su región de saturación. Al incorporar las resistencias gate-off esta limita la velocidad a la que se carga la puerta, lo que contribuye a reducir las sobre corrientes en el proceso de conmutación. Sin embargo, un valor elevado de dicha resistencia podría aumentar significativamente el tiempo de respuesta del MOSFET. Por otro lado, durante el apagado, la curva mostraba una caída más gradual, la resistencia ayudo a mejorar el tiempo de descarga de la puerta.

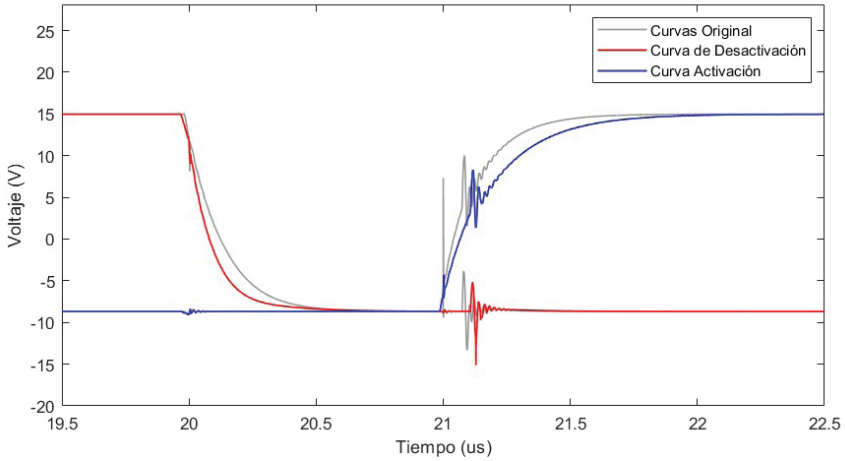


Figura 5. Gráfico del circuito incorporando las resistencias en gate-on y gate-off.

La adición de un capacitor al circuito mejora notablemente la estabilidad y el control durante el encendido y apagado de los MOSFET, ya que actúa como un filtro que atenúa las oscilaciones de tensión, proporcionando una conmutación más suave y controlada, como se observa en la Figura 6. Al suavizar las variaciones de tensión, el capacitor permite una transición más estable entre los estados de encendido y apagado, lo que es crucial para aplicaciones que requieren conmutaciones precisas y rápidas. Sin embargo, el capacitor introduce un ligero aumento en el tiempo de transición debido a su proceso de carga y descarga, lo que se refleja en un mayor tiempo de subida y caída de la tensión V_{gs}, aunque con una significativa reducción de las oscilaciones respecto a la curva sin capacitor.

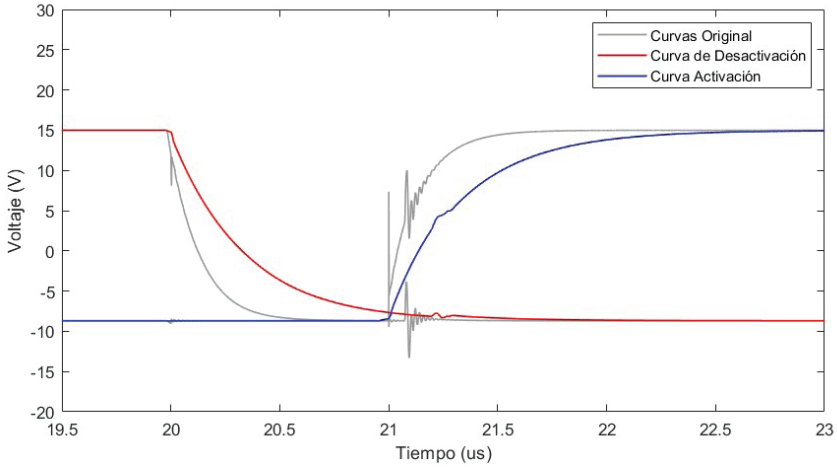


Figura 6. Gráfico del efecto del capacitor en V_{gs}.

La Figura 7 muestra los resultados de realizar la implementación de ambos métodos de mitigación, se destaca la reducción significativa de los picos de tensión y corriente, lo que refleja transiciones más suaves. Asimismo, se observa una mayor estabilidad en el circuito, evidenciada por una caída más controlada de la tensión V_{gs}, evitando picos abruptos. Por lo tanto, las modificaciones introducidas al circuito han demostrado ser efectivas para mejorar su rendimiento.

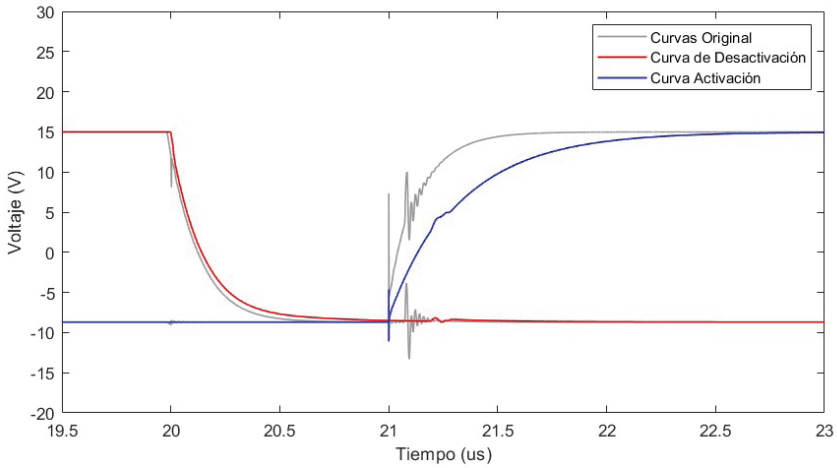


Figura 7. Prueba simulada de la implementación de ambas técnicas en un circuito de medio puente H.

Resultados y Análisis

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones y las pruebas experimentales realizadas en el laboratorio de investigación de la Universidad de Santiago de Chile evidencian una mejora significativa en la estabilidad y eficiencia de los MOSFETs mediante la implementación del circuito modificado.

El primer resultado experimental corresponde al circuito original de medio puente H (ver Figura 3), en el que se observaron altos picos de tensión durante la conmutación. Las oscilaciones generadas afectaron tanto la estabilidad como la eficiencia del sistema. En la Figura 8, se

observan las formas de onda medidas en el circuito físico, donde la curva amarrilla representa la tensión V_{gs} del MOSFET superior mientras que la curva verde representa al MOSFET inferior de la configuración medio puente H. A partir de estas, se detectaron variaciones bruscas en la tensión V_{gs} durante los estados de encendido y apagado de los MOSFETs, lo que incrementó las pérdidas por conmutación. Este comportamiento sugiere que el diseño no considera adecuadamente las características dinámicas del MOSFET, lo que da lugar a un rendimiento subóptimo.

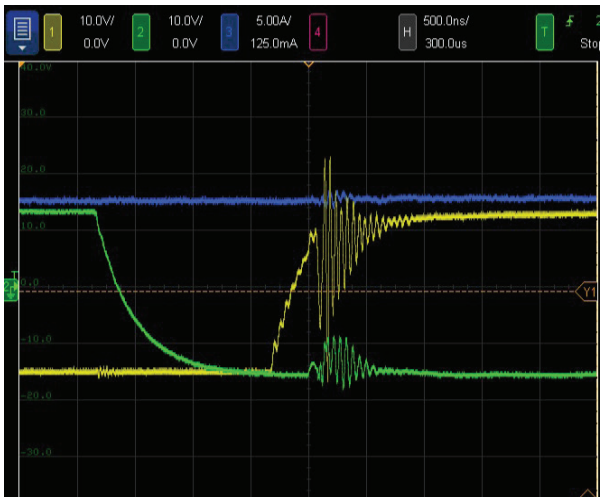


Figura 8. Prueba física de la operación de un medio puente H con 100V. (10 V/div, 500ns/div)

Para el siguiente resultado, se agregó un capacitor de 10 nF entre las compuertas puerta-fuente de los MOSFETs, lo que permitió reducir las oscilaciones tanto antes del encendido como durante el estado de apagado del transistor. En la Figura 9 se muestra una transición más suave con una reducción de picos en la tensión de las compuertas V_{gs} de ambos MOSFETS, representados por las curvas amarilla y verde, lo que indica una mejora en la estabilidad del sistema. Además, la curva azul que representa la corriente del circuito muestra una menor distorsión, lo que sugiere una mitigación efectiva de las oscilaciones. Sin embargo, se identificó un ligero aumento en los tiempos de transición, lo que indica que, si bien la estabilidad mejoró, es necesario considerar un equilibrio entre la velocidad de conmutación y la suavidad de las transiciones para optimizar el rendimiento del sistema.

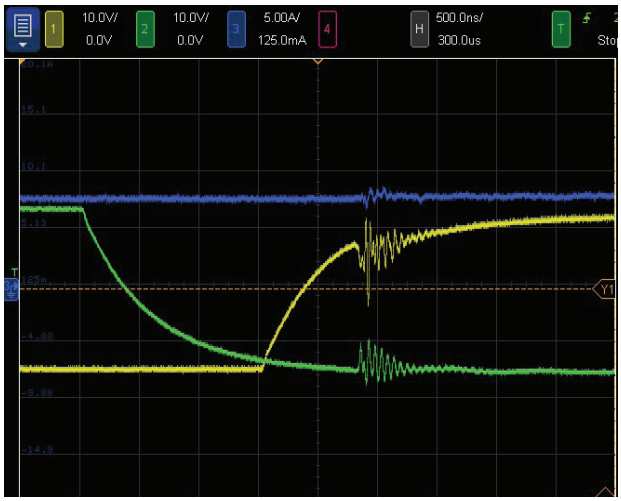


Figura 9. Prueba física de la operación de un medio puente H con 100V y un capacitor entre la puerta-fuente. (10 V/div, 500 ns/div)

Finalmente, se incorporó al circuito una resistencia gate-off de 20 Ω junto con un diodo de recuperación rápida, lo que resultó en una mejora significativa en estabilidad y eficiencia. Como se muestra en la Figura 10, las oscilaciones de ambas tensiones V_{gs}, se mantuvieron notablemente reducidas a pesar de la adición de estos componentes. Además, la inclusión de la resistencia y el diodo disminuyo considerablemente el tiempo de descarga de la tensión V_{gs} en comparación con la Figura 9. Las resistencias añadidas permitieron un mayor control sobre la velocidad de conmutación, lo que mejoró la eficiencia energética y redujo el estrés en los componentes. Este resultado es clave, ya que demuestra que la combinación adecuada de elementos pasivos puede optimizar el rendimiento del circuito.



Figura 10. Prueba física de la operación de un medio puente H con 100V, un capacitor entre la puerta-fuente y una resistencia con diodo en el Gate-on y Gate-off. (10 V/div, 500ns/div)

Además, como se observa en las 3 gráficas de las pruebas físicas, la corriente I_d se mantuvo en aproximadamente 7,5 A. La invariabilidad de la corriente indica que el sistema puede manejar las cargas sin riesgos de picos de corriente, algo que podría causar pérdidas significativas. Para complementar el análisis cualitativo, se presenta una tabla que resume los resultados cuantitativos obtenidos en las diferentes configuraciones del circuito.

Cuadro 1. Comparación de los resultados experimentales.

Prueba	Tensión Pico (V)	Tiempo de subida (ns)	Tiempo de bajada (ns)
Circuito original sin capacitor	23	1000	1000
Circuito con capacitor	12	1500	2000
Circuito con resistencia, diodo y capacitor	16	1300	1000

Conclusión y recomendaciones

Las modificaciones implementadas en el circuito, que incluyeron la incorporación de resistencias en el gate-on y gate-off, así como un capacitor entre la puerta y la fuente, resultaron en una mejora notable en la estabilidad del sistema, aunque con un ligero aumento en los tiempos de conmutación. Las pruebas demostraron una reducción significativa en los picos de tensión,

que bajaron de 23 V en el circuito original a 16 V en la configuración final con resistencias, diodo y capacitor. Sin embargo, los tiempos de subida y bajada, que se mantuvieron en valores comparables o ligeramente superiores, reflejan un compromiso aceptable en la optimización y reducción de las oscilaciones.

Este balance, aunque con un leve incremento en los tiempos de transición, fue clave para reducir las perturbaciones y las oscilaciones observadas en el circuito original, lo que permitió suavizar las transiciones de tensión y mejorar la conmutación de los MOSFETs. Se confirmó que el aumento en los tiempos de conmutación fue compensado por una mayor estabilidad y eficiencia del sistema, lo que valida las modificaciones propuestas.

Para futuros estudios, se recomienda explorar el impacto de diferentes valores de capacitancia entre la puerta y la fuente, con el objetivo de encontrar una configuración óptima que minimice aún más las oscilaciones sin afectar significativamente la velocidad de conmutación. Además, sería beneficioso realizar pruebas con distintos tipos de MOSFETs, considerando sus características dinámicas y tiempos de respuesta, para evaluar la aplicabilidad de las modificaciones en una gama más amplia de dispositivos. Asimismo, se sugiere analizar la implementación de otros elementos pasivos o técnicas de control que puedan mejorar aún más la eficiencia y estabilidad del sistema, garantizando una conmutación más precisa y confiable.

Referencias

[1] M. A. Perez, S. Ceballos, G. Konstantinou, J. Pou and R. P. Aguilera, “Modular Multilevel Converters: Recent Achievements and Challenges,” IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 2, pp. 224-239, 2021, doi: 10.1109/OJIES.2021.3060791

[2] Y. Arias-Esquivel, R. Cárdenas, M. Urrutia, M. Díaz, L. Tarisciotti, y J. C. Clare, “Continuous Control Set Model Predictive Control of a Modular Multilevel Converter for Drive Applications,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 70, no. 9, pp. 8723-8733, Sep. 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3210515.

[3] Priya, M., Ponnambalam, P. and Muralikumar, K, “Modular-multilevel converter topologies and applications – a review,” IET Power Electronics, vol. 12, pp. 170-183, Jan. 2019, doi: 10.1049/iet-pel.2018.5301

[4] F. Rodríguez, D. Garrido, R. Núñez, G. Oggier, y G. García, «Modelado dinámico y de estado estacionario para la conexión modular entrada serie - salida serie de convertidores con puentes duales activos», *Rev. iberoam. autom. inform. ind.*, vol. 18, n.º 4, pp. 371–384, Sep. 2021, doi: 10.4995/riai.2021.14866.

[5] D. Murillo-Yarce, A. Alzate-Gomez, & A. Escobar-Mejía, “Análisis comparativo del control predictivo de corriente en convertidores vsi empleados en la conexión a red de energías renovables”, TecnoLógicas, vol. 21, no. 41, p. 45-62, 2018. doi: 10.22430/22565337.714

[6] R. Stark, A. Tsibizov, I. Kovacevic-Badstuebner, T. Ziemann and U. Grossner, “Gate Capacitance Characterization of Silicon Carbide and Silicon Power mosfets Revisited,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 9, pp. 10572-10584, Sept. 2022, doi: 10.1109/TPEL.2022.3164360.

[7] U. Jadli, F. Mohd-Yasin, H. A. Moghadam, P. Pande, J. R. Nicholls and S. Dimitrijev, “Measurement of Power Dissipation Due to Parasitic Capacitances of Power MOSFETs,” in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 187043-187051, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3030269.

[8] D. Zięba and J. Rąbkowski, “Problems related to the correct determination of switching power losses in high-speed SiC MOSFET power modules,” Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, p. 140695, Feb. 2022, doi: 10.24425/bpasts.2022.140695.

[9] A. Ong, J. Carr, J. Balda and A. Mantooth, “A Comparison of Silicon and Silicon Carbide MOSFET Switching Characteristics,” 2007 IEEE Region 5 Technical Conference, Fayetteville, AR, USA, 2007, pp. 273-277, doi: 10.1109/TPSD.2007.4380318.

[10] D. Cittanti, F. Iannuzzo, E. Hoene and K. Klein, “Role of parasitic capacitances in power MOSFET turn-on switching speed limits: A SiC case study,” *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Cincinnati, OH, USA, 2017, pp. 1387-1394, doi: 10.1109/ECCE.2017.8095952.

[11] J. Boehmer, J. Schumann and H. -G. Eckel, “Effect of the miller-capacitance during switching transients of IGBT and MOSFET,” 2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), Novi Sad, Serbia, 2012, pp. LS6d.3-1-LS6d.3-5, doi: 10.1109/EPEPEMC.2012.6397498.

[12] A. Fratta, P. Guglielmi, E. Armando, S. Taraborrelli and G. Cristallo, “Commutation losses reduction in high voltage power MOSFETs by proper commutation circuit,” *2011 IEEE International Conference on Industrial Technology*, Auburn, AL, USA, 2011, pp. 127-132, doi: 10.1109/ICIT.2011.5754359.

[13] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design. 1995.

[14] H. Peng, J. Chen, Z. Cheng, Y. Kang, J. Wu and X. Chu, “Accuracy-Enhanced Miller Capacitor Modeling and Switching Performance Prediction for Efficient SiC Design in High-Frequency X-Ray High-Voltage Generators,” in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 1, pp. 179-194, March 2020, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2951743.

[15] Yuan, D.; Zhang, Y.; Wang, X. An Improved Analytical Model for Crosstalk of SiC MOSFET in a Bridge-Arm Con figuration. *Energies* 2021, *14*, 683, doi: 10.3390/en14030683.

[16] J. Tan and Z. Zhou, “An optimized switching strategy based on gate drivers with variable voltage to improve the switching performance of sic mosfet modules”, Energies, vol. 16, no. 16, p. 5984, 2023, doi: 10.3390/en16165984.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Relaciones entre características morfológicas del fruto de cuayote (*Gonolobus edulis*)

Relations among morphological characteristics of the cuayote (*Gonolobus edulis*) fruit

José Eladio Monge-Pérez[1], Michelle Loría-Coto[2]

Fecha de recepción: 18 de febrero, 2025
Fecha de aprobación: 2 de julio, 2025

Monge-Pérez, J.E; Loría-Coto, M. Relaciones entre características morfológicas del fruto de cuayote (*Gonolobus edulis*). *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 1. Enero-Marzo, 2026. Pág. 160-173.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i1.7738

1 Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos, Universidad de Costa Rica, Turrialba, Costa Rica.
jose.mongeperez@ucr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0002-5384-507X

2 Escuela de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Estatal a Distancia, Sabanilla, Costa Rica.
michelle_loria@yahoo.com
https://orcid.org/0000-0003-0456-2230

Palabras clave

Apocynaceae; accesiones; peso del fruto; Costa Rica; Centroamérica; variabilidad.

Resumen

Se cuantificó la relación entre características morfológicas del fruto de cuayote (*Gonolobus edulis*). Entre setiembre y noviembre de 2024, se colectaron frutos de cuatro accesiones de cuayote, y se evaluaron las siguientes características: peso (g), longitud (mm), ancho (mm), grosor (mm), número de alas ventrales (completas, incompletas y total), número de alas dorsales (completas, incompletas y total), número total de alas completas, número total de alas incompletas, número total de alas longitudinales, relación longitud:ancho, relación longitud:grosor, y relación ancho:grosor. Se calculó la correlación de Spearman para la relación entre todas las variables, y también para la relación entre la altitud del sitio de recolección y las demás variables. Se hallaron 20 correlaciones entre variables que fueron altas ($r \geq 0,63$) y significativas ($p \leq 0,05$), de las cuales 13 fueron entre variables relacionadas con las alas del fruto. Se obtuvo una correlación positiva alta entre la altitud del sitio de recolección y: peso ($r=0,72^{**}$), ancho ($r=0,66^{**}$), y grosor ($r=0,71^{**}$) del fruto. Este trabajo constituye el primer informe sobre el estudio de las relaciones entre características morfológicas de los frutos de cuayote.

Keywords

Apocynaceae; accesions; fruit weight; Costa Rica; Central America; variability.

Abstract

The relationship between morphological characteristics of the cuayote (*Gonolobus edulis*) fruit was quantified. Between September and November 2024, fruits were collected from four cuayote accessions, and the following characteristics were evaluated: weight (g), length (mm), width (mm), thickness (mm), number of ventral wings (complete, incomplete and total), number of dorsal wings (complete, incomplete and total), total number of complete wings, total number of incomplete wings, total number of longitudinal wings, length:width ratio, length:thickness ratio, and width:thickness ratio. Spearman's correlation was calculated for the relationship between all variables, and also for the relationship between the altitude of the collection site and the other variables. Twenty correlations were found between variables that were high ($r \geq 0.63$) and significant ($p \leq 0.05$), of which 13 were between variables related to the wings of the fruit. A high positive correlation was found between altitude of the collection site and: weight ($r=0.72^{**}$), width ($r=0.66^{**}$), and thickness ($r=0.71^{**}$) of the fruit. This work constitutes the first report on the study of the relationships between morphological characteristics of cuayote fruits.

Introducción

El cuayote (*Gonolobus edulis* Hemsl.), es una planta perteneciente a la familia Apocynaceae, endémica de Costa Rica y Panamá [1]; sus frutos son consumidos como hortaliza o postre; los frutos tiernos se consumen asados, y con los frutos maduros (sazones) se hace un dulce [2] [3] [4] [5], el cual es considerado de alta calidad (J.E. Monge-Pérez, datos sin publicar). Esta especie también recibe los nombres de cuajote y coayote, y se le llama chinchayote en Nicaragua [3]. Es una planta trepadora, y sus hojas son simples y opuestas [3] [6]. No existen informes de que esta especie sea cultivada [3].

El género *Gonolobus* es de origen americano, y comprende entre 140 a 150 especies, distribuidas en la vegetación tropical y subtropical desde el este de Estados Unidos hasta el norte de Argentina, incluyendo las Antillas [7] [8] [9] [10] [11] [5] [12] [13], y de las cuales en América Central crecen unas 45-50 especies [6]; los frutos de muchas de estas especies son comestibles [14]. Este género es morfológicamente diverso, y cuenta con 45 especies en México, tales como *G. lozadae*, *G. erianthus*, *G. triflorus*, *G. barbatus*, *G. cthulhui*, *G. incerianus*, *G. cteniophorus*, *G. villasenorii*, *G. grandiflorus*, *G. stenanthus*, y *G. gonzaleziarum* [15] [16] [14] [6] [12] [5]. En Costa Rica también se encuentran otras especies de este género, tales como *G. taylorianus* W. D. Stevens & Montiel [3], y *G. albomarginatus* [17]; la distribución de *G. taylorianus* es desde Guatemala hasta Costa Rica, y en el sur del estado de la Florida, EEUU [18]. Los caracteres diagnósticos de *Gonolobus* son los apéndices estaminales en forma de lámina, y frutos comúnmente con 4 o 5 alas, con base recurvada que forma un ángulo agudo con el pedúnculo [5]. *G. edulis* se distingue de otras especies de este género, por sus flores con corola de color blanco [5], mientras que *G. taylorianus* presenta una corola de color verde [18].

Se desconoce el valor nutricional de *G. edulis*. Sin embargo, en el caso de *G. taylorianus* se ha estudiado el contenido de fenoles totales y su actividad antioxidante [19], y también se ha identificado la presencia de triterpenos, glicósidos cardiotónicos, carbohidratos, esteroides, y flavonoides; estos componentes podrían tener efectos benéficos para la salud humana, tales como propiedades anticancerígenas, prevención de enfermedades del corazón, actividad analgésica, fijación de radicales libres, efecto hepatoprotector y antiinflamatorio, así como actividad antioxidante [20]; además, también se conoce su efecto medicinal mediante el uso del látex de la planta para la eliminación de verrugas, así como el uso del extracto del fruto hervido para la prevención o tratamiento de problemas de próstata [20].

El cuayote se encuentra en bosques estacionalmente secos, bosques muy húmedos, en elevaciones de 100 a 2200 msnm. Su distribución geográfica corresponde a Costa Rica y Panamá [1], y aparentemente también Nicaragua [3]. En Costa Rica se ha registrado en Guanacaste, Monteverde, El Empalme, los cerros del Tablazo, el Valle Central, y el Pacífico Sur [3]. Se ha descrito que su floración va de mayo hasta septiembre, y la fructificación entre agosto y enero [3]. Las especies de *Gonolobus* suelen presentar tolerancia a la perturbación antrópica, por lo que pueden crecer en sitios como cafetales, muros, milpas, orillas de carreteras y afloramientos rocosos, e incluso pueden verse favorecidas por la perturbación humana, ocupando espacio dentro de zonas urbanas [5]; esta alta rusticidad de las plantas se debe probablemente a la amplia presencia de fibras en todos los órganos de la planta (J.E. Monge-Pérez, datos sin publicar).

Los frutos de cuayote son fusiformes, con una longitud entre 10 y 12 cm, con cuatro o cinco alas longitudinales, y cuyo color al madurar es verde claro [5] [3]; cada fruto posee entre 600 y 650 semillas (J.E. Monge-Pérez, datos sin publicar); el fruto maduro se abre por una sutura longitudinal dorsal y de esta forma libera las semillas (J.E. Monge-Pérez, datos sin publicar); cada semilla posee un mechón de pelos apicales (coma micropilar o vilano), que les facilitan ser transportadas por el viento [5] [3]. Los frutos, así como los otros órganos de la planta, poseen abundante látex blanco [6], el que debe ser eliminado antes de consumir los frutos [4].

Otros investigadores han estudiado las relaciones entre varias características morfológicas de los frutos de diversas especies, como melón [21] [22], uchuva (*Physalis peruviana*) [23], ayote (*Cucurbita moschata*) [24], pepino [25] [26] [27], manzana [28], pimiento [29] [30] [31], tomate [32] [33] [34], okra [35], berenjena [36] [37] [38], fresa [39], así como la especie *Caesalpinia ebano* [40] y la cucurbitácea *Benincasa hispida* [41].

En otras investigaciones se han estudiado las alas de los frutos de varias especies vegetales, y su utilidad en la clasificación taxonómica [42].

El análisis de correlación es una herramienta que ayuda a medir el grado de asociación entre diversos rasgos cuantitativos [27]. En aquellas situaciones en que los datos no se ajustan a una distribución normal, se debe utilizar la estadística no paramétrica; en este caso, se utiliza la correlación de Spearman para el estudio de las relaciones entre variables [43] [44].

El objetivo del trabajo fue cuantificar la relación entre características morfológicas del fruto de cuatro accesiones de cuayote.

Materiales y métodos

Se colectaron frutos de cuatro accesiones de cuayote (*Gonolobus edulis*), procedentes de diversos sitios de Costa Rica (cuadro 1); se recolectaron entre 10 y 26 frutos sazones por accesión, según la disponibilidad al momento de la colecta, para un total de 75 frutos evaluados. Se registró la altitud y las coordenadas geográficas de cada sitio de colecta, mediante un medidor modelo GPS-MAP 78S, marca Garmin. Las colectas se realizaron entre los meses de septiembre y noviembre de 2024.

Cuadro 1. Sitios de recolección de las accesiones de cuayote.

Accesión	Lugar de recolección	Coordenadas geográficas		Altitud (msnm)
		Latitud Norte	Longitud Oeste	
1	Ochomogo, Cartago	9° 54’ 20,0732400”	83° 56’ 2,4182160”	1716
2	Cervantes, Alvarado, Cartago	9° 52’ 55,0917480”	83° 49’ 4,6214040”	1531
3	San Pedro, Montes de Oca, San José	9° 56’ 22,9937280”	84° 3’ 9,3102840”	1188
4	Curridabat, San José	9° 55’ 20,0467200”	84° 2’ 23,7644520”	1166

Se evaluaron las siguientes variables:

1. Peso del fruto (g): se evaluó en cada uno de los frutos colectados, y se calculó el promedio.
2. Longitud del fruto (mm): se midió en cada uno de los frutos colectados, y se obtuvo el promedio.
3. Ancho del fruto (mm): se evaluó en cada uno de los frutos colectados, y se calculó el promedio. Esta medición se realizó entre las dos alas ventrales; se consideró como la parte ventral del fruto aquella cara sobre la que se ubica el pedúnculo, y que siempre es más oscura que el resto del fruto (J.E. Monge-Pérez, datos sin publicar).
4. Grosor del fruto (mm): se midió en cada uno de los frutos colectados, y se obtuvo el promedio. Esta medición se realizó entre la parte ventral y la parte dorsal del fruto.
5. Número de alas ventrales completas: se registró en cada uno de los frutos colectados, y se calculó el promedio; las alas completas son aquellas que se extienden en forma continua a nivel longitudinal, entre ambos extremos del fruto.
6. Número de alas ventrales incompletas: se registró en cada uno de los frutos colectados, y se calculó el promedio; las alas incompletas son aquellas que no mantienen la continuidad longitudinal entre ambos extremos del fruto.

7. Número de alas dorsales completas: se registró en cada uno de los frutos colectados, y se calculó el promedio.
8. Número de alas dorsales incompletas: se registró en cada uno de los frutos colectados, y se calculó el promedio.
9. Número total de alas ventrales: se registró en cada uno de los frutos colectados, y se calculó el promedio.
10. Número total de alas dorsales: se registró en cada uno de los frutos colectados, y se calculó el promedio.
11. Número total de alas completas: se registró en cada uno de los frutos colectados, y se calculó el promedio.
12. Número total de alas incompletas: se registró en cada uno de los frutos colectados, y se calculó el promedio.
13. Número total de alas longitudinales del fruto: se registró en cada uno de los frutos colectados, y se calculó el promedio.
14. Relación longitud:ancho del fruto: se obtuvo al dividir la longitud entre el ancho para cada uno de los frutos, y se calculó el promedio.
15. Relación longitud:grosor del fruto: se obtuvo al dividir la longitud entre el grosor para cada uno de los frutos, y se obtuvo el promedio.
16. Relación ancho:grosor del fruto: se obtuvo al dividir el ancho entre el grosor para cada uno de los frutos, y se calculó el promedio.

Para la evaluación del peso del fruto se utilizó una balanza electrónica marca Salter Brecknell, modelo PB500, con una capacidad de 500,0 ± 0,1 g. Para la evaluación de las dimensiones del fruto, se usó un calibrador electrónico marca Pittsburgh con una capacidad de 154,5 ± 0,1 mm, así como una regla con una capacidad de 300 ± 1 mm.

Para todas las variables, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilks modificado, la cual confirmó que los datos de la mayoría de las variables no se ajustaron a una distribución normal. Por lo tanto, para el análisis de la relación entre las variables, se calculó el coeficiente de correlación de Spearman, y para aquellas combinaciones de variables en que se encontró una alta correlación ($r \geq 0,63$) y significancia estadística ($p \leq 0,05$), se obtuvo el diagrama de dispersión de los datos (excepto para las variables relacionadas con las alas longitudinales del fruto, por ser variables discretas). Para todos los análisis de datos se utilizó el paquete estadístico InfoStat [43].

Resultados y discusión

En el cuadro 2 se muestran los estimadores estadísticos de las variables evaluadas en este ensayo. La mayor variabilidad de los datos se halló en el número de alas dorsales completas y en el número de alas ventrales incompletas del fruto, mientras que la menor variación se encontró en el número de alas ventrales completas y en la relación ancho:grosor del fruto.

Cuadro 2. Estimadores estadísticos de características morfológicas de frutos de cuayote.

Variable	Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)	Valor mínimo	Valor máximo	Mediana
PF	271,28	79,13	29,17	120,90	489,00	251,60
LF	145,94	17,61	12,06	108,10	190,00	146,90
AF	87,34	13,87	15,88	60,60	113,30	87,60
GF	80,89	9,75	12,05	59,50	104,60	80,50
AVC	2,00	0,16	8,22	1	3	2
AVI	0,48	0,55	115,44	0	2	0
ADC	0,33	0,66	199,32	0	2	0
ADI	1,76	0,73	41,61	0	3	2
TAV	2,48	0,53	21,34	2	4	2
TAD	2,09	0,37	17,86	1	3	2
TAC	2,33	0,66	28,47	2	4	2
TAI	2,24	0,80	35,83	1	4	2
TAL	4,57	0,68	14,90	3	6	5
L/A	1,70	0,24	13,90	1,32	2,26	1,65
L/G	1,82	0,23	12,54	1,28	2,32	1,82
A/G	1,08	0,11	10,03	0,84	1,32	1,10

Nota: PF: peso del fruto (g); LF: longitud del fruto (mm); AF: ancho del fruto (mm); GF: grosor del fruto (mm); AVC: número de alas ventrales completas del fruto; AVI: número de alas ventrales incompletas del fruto; ADC: número de alas dorsales completas del fruto; ADI: número de alas dorsales incompletas del fruto; TAV: número total de alas ventrales del fruto; TAD: número total de alas dorsales del fruto; TAC: número total de alas completas del fruto; TAI: número total de alas incompletas del fruto; TAL: número total de alas longitudinales del fruto; L/A: relación longitud:ancho del fruto; L/G: relación longitud:grosor del fruto; A/G: relación ancho:grosor del fruto.

Con respecto a la correlación entre la altitud del sitio de recolección y las diversas características morfológicas del fruto de cuayote, se hallaron tres correlaciones altas y significativas, entre la altitud y: el peso del fruto (r=0,72**); el ancho del fruto (r=0,66**); y el grosor del fruto (r=0,71**) (cuadro 3).

Cuadro 3. Coeficientes de correlación de Spearman (r) entre la altitud del sitio de recolección y características morfológicas de frutos de cuayote.

Variable	Altitud (msnm)
PF	**0,72****
LF	0,50**
AF	**0,66****
GF	**0,71****
AVC	0,50**
AVI	0,14ns
ADC	0,16ns
ADI	0,37**
TAV	0,15ns
TAD	0,44**
TAC	0,16ns
TAI	0,29**
TAL	0,20ns
L/A	-0,23*
L/G	-0,13ns
A/G	0,18ns

Nota: PF: peso del fruto (g); LF: longitud del fruto (mm); AF: ancho del fruto (mm); GF: grosor del fruto (mm); AVC: número de alas ventrales completas del fruto; AVI: número de alas ventrales incompletas del fruto; ADC: número de alas dorsales completas del fruto; ADI: número de alas dorsales incompletas del fruto; TAV: número total de alas ventrales del fruto; TAD: número total de alas dorsales del fruto; TAC: número total de alas completas del fruto; TAI: número total de alas incompletas del fruto; TAL: número total de alas longitudinales del fruto; L/A: relación longitud:ancho del fruto; L/G: relación longitud:grosor del fruto; A/G: relación ancho:grosor del fruto; altitud: altitud sobre el nivel del mar (msnm); ns: no significativa; *: significativa ($p \leq 0,05$); **: altamente significativa ($p \leq 0,01$). Se resaltan en letra negrita las correlaciones significativas ($p \leq 0,05$) y consideradas altas ($r \geq 0,63$).

Las altas correlaciones positivas halladas para el peso, ancho y grosor del fruto, sugieren que los valores de dichas variables tienden a aumentar conforme aumenta la altitud del sitio de recolección, al menos para las cuatro accesiones de cuayote evaluadas. Esto podría deberse a las diferentes condiciones ambientales en cada sitio de recolección, en especial la temperatura, que es menor conforme aumenta la altitud; sin embargo, no hay datos en la literatura sobre el efecto de las variables ambientales en las características morfológicas del fruto de cuayote. Por otra parte, en el cultivo de chayote (*Sechium edule*), de la familia Cucurbitaceae, se encontró un resultado contrario al hallado en la presente investigación, pues se halló una correlación negativa entre la altitud y las características de peso, ancho y grosor del fruto; es decir, a mayor altitud, menores valores para dichas variables [45].

En el cuadro 4 se muestran los coeficientes de correlación de Spearman entre las variables relacionadas con las alas longitudinales del fruto. Se hallaron 13 correlaciones entre variables que fueron altas ($r \geq 0,63$) y significativas ($p \leq 0,05$); las correlaciones más altas se obtuvieron entre ADC y TAC (r=0,99**), entre AVI y TAV (r=0,98**), y entre TAV y TAL (r=0,90**). No se encontraron referencias en la literatura sobre correlaciones relacionadas con el número de alas en frutos en ninguna especie vegetal.

Cuadro 4. Coeficientes de correlación de Spearman (r) entre variables relacionadas con las alas longitudinales de frutos de cuayote.

	AVI	ADC	ADI	TAV	TAD	TAC	TAI	TAL
AVC	0,53**	**0,68****	**0,63****	0,58**	**0,73****	**0,70****	0,47**	0,53**
AVI		0,55**	0,15ns	**0,98****	0,51**	0,54**	0,57**	**0,89****
ADC			-0,07ns	0,57**	0,59**	**0,99****	-0,06ns	0,54**
ADI				0,13ns	**0,73****	-0,07ns	**0,79****	0,29**
TAV					0,50**	0,57**	0,54**	**0,90****
TAD						0,59**	**0,66****	**0,71****
TAC							-0,07ns	0,54**
TAI								**0,65****

Nota: AVC: número de alas ventrales completas del fruto; AVI: número de alas ventrales incompletas del fruto; ADC: número de alas dorsales completas del fruto; ADI: número de alas dorsales incompletas del fruto; TAV: número total de alas ventrales del fruto; TAD: número total de alas dorsales del fruto; TAC: número total de alas completas del fruto; TAI: número total de alas incompletas del fruto; TAL: número total de alas longitudinales del fruto; ns: no significativa; *: significativa (p≤0,05); **: altamente significativa (p≤0,01). Se resaltan en letra negrita las correlaciones significativas (p≤0,05) y consideradas altas (r≥0,63).

A continuación, se detallan los coeficientes de correlación y el diagrama de dispersión de los datos, para las otras siete correlaciones entre variables morfológicas en frutos de cuayote, que fueron altas (r≥0,63) y significativas (p≤0,05).

Con respecto a la relación entre longitud y peso del fruto (figura 1), la correlación fue alta, positiva, y altamente significativa (r=0,70**); lo cual sigue la lógica de que un fruto más largo por lo general tiene mayor peso. De la misma forma, en otros cultivos también se ha encontrado una correlación alta y significativa entre estas variables, como en el caso de *Caesalpinia ebano* (r=0,98**) [40], tomate (r=0,64-0,69**) [32] [33], melón (r=0,76**) [21], ayote (*Cucurbita moschata*) (r=0,91*) [24], pepino (r=0,68-0,99**) [25] [26] [27], *Benincasa hispida* (r=0,86**) [41], y berenjena (r=0,98**) [37]; por otra parte, en otros estudios se halló que esta correlación fue moderada en berenjena (r=0,60**) [36], pimiento (r=0,62**) [29] y manzana (r=0,59*) [28]. En forma contraria, en otro ensayo en pimiento la correlación hallada entre estas variables fue negativa y moderada (r=-0,50**) [31]; y dicha correlación no fue significativa en los cultivos de berenjena [38], pimiento [30], fresa [39] y uchuva [23].

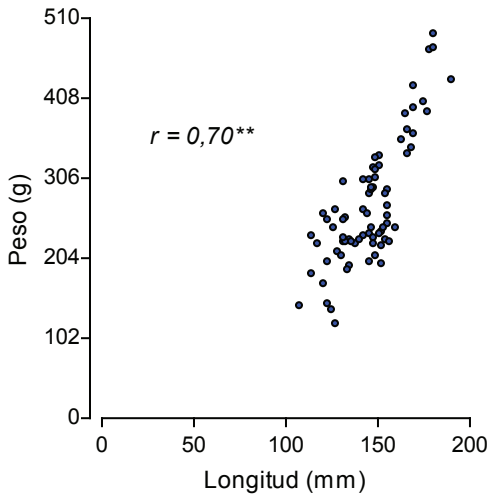


Figura 1. Diagrama de dispersión de la relación entre longitud y peso del fruto de cuatro accesiones de cuayote.

En cuanto a la relación entre ancho y peso del fruto (figura 2), la correlación fue alta, positiva y altamente significativa (r=0,72**). Esta relación es lógica, dado que generalmente un fruto más ancho tiene mayor peso. De la misma forma que en el presente estudio, otros investigadores también hallaron una correlación alta y positiva entre estas características en tomate (r=0,75**) [32], *Benincasa hispida* (r=0,91**) [41], berenjena (r=0,76-0,92**) [36] [37], pepino (r=0,66-0,67**) [25] [26], *Caesalpinia ebano* (r=0,80**) [40], ayote (*Cucurbita moschata*) (r=0,95**) [24], melón (r=0,84-0,88**) [21] [46], y pimiento (r=0,89**) [31]. Por otra parte, en otros estudios se obtuvo una correlación moderada entre estas variables, en manzana (r=0,59*) [28], uchuva (r=0,43*) [23], pepino (r=0,39**) [27], berenjena (r=0,47**) [38], fresa (r=0,59**) [39], y pimiento (r=0,57-0,61**) [29] [30]. Además, esta correlación no fue significativa en otro estudio en tomate [33].

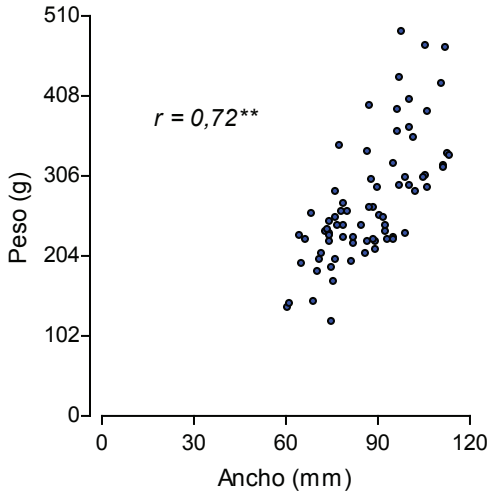


Figura 2. Diagrama de dispersión de la relación entre ancho y peso del fruto de cuatro accesiones de cuayote.

Para la relación entre grosor y peso del fruto (figura 3), la correlación fue alta, positiva y altamente significativa (r=0,82**). Esta es una relación que también tiene lógica, dado que generalmente un fruto más grueso tiene mayor peso. De la misma forma que en el presente ensayo en cuayote, se obtuvo una correlación alta y positiva entre estas variables en *Benincasa hispida* (r=0,78**) [41]; sin embargo, en forma contraria, dicha correlación no fue significativa en *Caesalpinia ebano* [40].

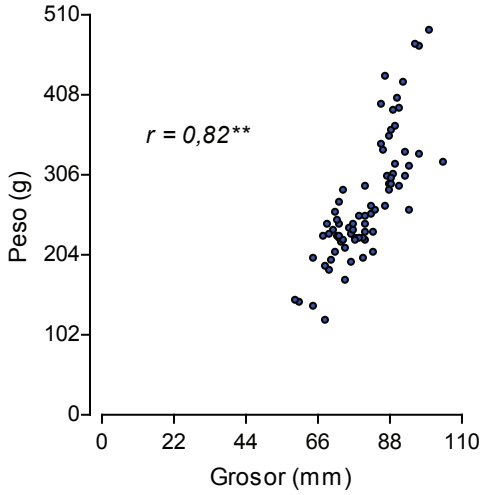


Figura 3. Diagrama de dispersión de la relación entre grosor y peso del fruto de cuatro accesiones de cuayote.

Con respecto a la relación entre ancho y grosor del fruto (figura 4), la correlación fue alta, positiva y altamente significativa (r=0,78**). Esta es una relación que no es necesariamente lógica; a pesar de esto, es importante considerarla en programas de fitomejoramiento, dado que permitiría utilizar como criterio de selección solamente una de estas variables, por ejemplo, el ancho del fruto. Al igual que en el presente ensayo, otros investigadores también hallaron una correlación positiva y alta entre estas variables en *Benincasa hispida* (r=0,81**) [41]; por otra parte, esta correlación no fue significativa en *Caesalpinia ebano* [40].

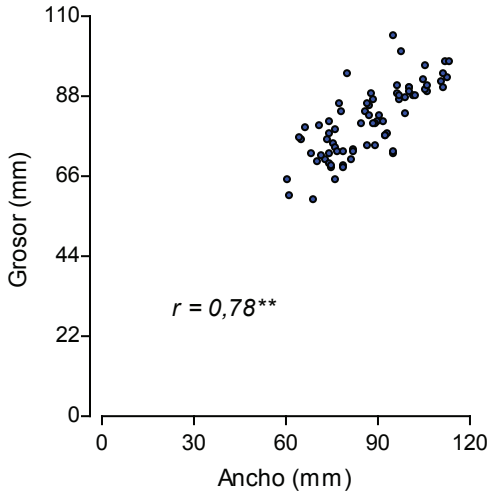


Figura 4. Diagrama de dispersión de la relación entre ancho y grosor del fruto de cuatro accesiones de cuayote.

En cuanto a la relación entre ancho y relación longitud:ancho del fruto (figura 5), la correlación fue alta, negativa y altamente significativa (r=-0,67**). Esta es una relación lógica, debido a que la variable AF corresponde al denominador de la relación L/A. En el cultivo de fresa, al igual que en el presente ensayo, también se obtuvo una correlación negativa y significativa entre estas variables (r=-0,80**) [39]. Por otra parte, en el cultivo de melón se encontró una correlación también negativa, pero moderada, entre ambas variables (r=-0,42**) [46]; mientras que en el cultivo de manzana esta correlación no fue significativa [28].

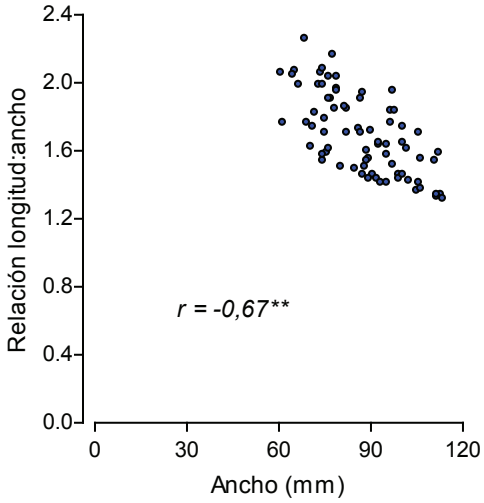


Figura 5. Diagrama de dispersión de la relación entre ancho y relación longitud:ancho del fruto de cuatro accesiones de cuayote.

Para la relación entre ancho y relación ancho:grosor del fruto (figura 6), la correlación fue alta, positiva y altamente significativa (r=0,66**). Nuevamente, esta es una relación lógica, ya que la variable AF corresponde al numerador de la relación A/G. Para esta relación no se hallaron informes en la literatura.

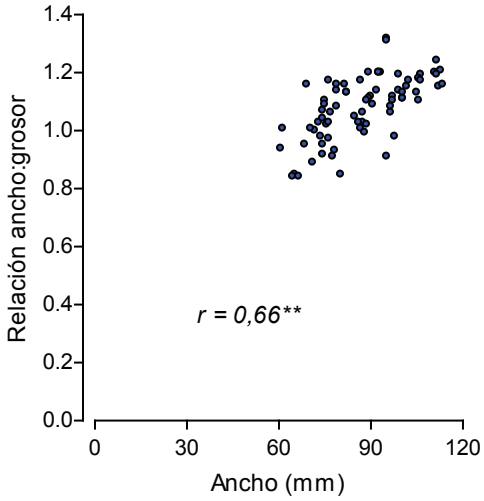


Figura 6. Diagrama de dispersión de la relación entre ancho y relación ancho:grosor del fruto de cuatro accesiones de cuayote.

Para la correlación entre relación longitud:ancho y relación longitud:grosor del fruto (figura 7), la correlación fue alta, positiva y altamente significativa (r=0,73**). Esta es una relación lógica, pues ambas variables comparten a LF en el numerador. Para esta relación no se hallaron informes en la literatura.

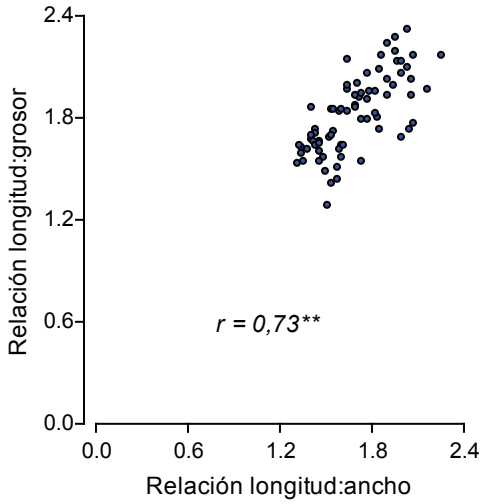


Figura 7. Diagrama de dispersión de la relación entre relación longitud:ancho y relación longitud:grosor del fruto de cuatro accesiones de cuayote.

Conclusiones

Se hallaron 20 correlaciones entre características morfológicas de los frutos de cuayote, que fueron altas (r≥0,63) y significativas (p≤0,05), de las cuales 13 fueron entre variables relacionadas con las alas del fruto.

Se obtuvo una correlación positiva alta entre la altitud del sitio de recolección y: peso (r=0,72**), ancho (r=0,66**), y grosor (r=0,71**) del fruto.

Este trabajo constituye el primer informe sobre el estudio de las relaciones entre características morfológicas de los frutos de cuayote.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento recibido de parte de la Universidad de Costa Rica, para la realización de esta investigación.

Referencias

[1] Royal Botanic Gardens, Kew, «*Gonolobus edulis* Hemsl.,» 2 Diciembre 2024. [En línea]. Disponible en: https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:97834-1.

[2] R. González, «De brotes, flores y palmitos: alimentos olvidados,» *Agronomía Costarricense,* vol. 32, nº 2, pp. 183-192, 2008.

[3] C. Chízmar, Plantas comestibles de Centroamérica, Santo Domingo, Heredia, Costa Rica: Instituto Nacional de Biodiversidad, 2009.

[4] R. González, 15 alimentos subutilizados; de alto valor para Costa Rica, San José, Costa Rica: Ministerio de Salud, 2012.

[5] C. O. Cervantes, «Lista anotada e ilustrada del género *Gonolobus* (Gonolobineae, Asclepiadoideae) en México,» Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, 2023.

[6] G. C. Fernández-Concha y W. Cetzal-Ix, «El género *Gonolobus* (Apocynaceae, Asclepiadoideae, Gonolobinae) en la porción mexicana de la Península de Yucatán: la novedad indocumentada,» *Desde el Herbario CICY,* vol. 7, pp. 1-5, 2015.

[7] G. Morillo, «Nuevas especies y nuevas combinaciones en las Gonolobinae (Apocynaceae, Asclepiadoideae, Asclepiadeae) de Centro y Sudamérica,» *Lilloa,* vol. 53, nº 1, pp. 89-106, 2016.

[8] A. Krings, F. Areces y J. C. Lazcano, «New and rediscovered milkweeds from Cuba: *Calotropis gigantea* and *Gonolobus stephanotrichus* (Apocynaceae: Asclepiadoideae),» *Willdenowia,* vol. 35, pp. 315-318, 2005.

[9] A. Krings, «Distribution and phenology of *Gonolobus suberosus* (Apocynaceae, Asclepiadoideae) and its varieties in North America,» *Vulpia,* vol. 5, pp. 23-40, 2006.

[10] A. Krings, «Synopsis of *Gonolobus* s.s. (Apocynaceae: Asclepiadoideae) in Trinidad and Tobago,» *Journal of the Botanical Research Institute of Texas,* vol. 3, nº 1, pp. 77-83, 2009.

[11] L. O. Alvarado-Cárdenas, M. B. Núñez-Oberg y C. S. Islas-Hernández, «Nuevo *Gonolobus* (Apocynaceae, Asclepiadoideae, Gonolobeae, Gonolobineae) para la Faja Volcánica Transmexicana, Puebla, México,» *Botanical Sciences,* vol. 102, nº 1, pp. 223-233, 2024.

[12] L. O. Alvarado-Cárdenas, E. B. Cortez y C. O. Cervantes, «*Gonolobus lozadae*, una nueva especie de Apocynaceae del estado de Oaxaca, México,» *Botanical Sciences,* vol. 99, nº 2, pp. 447-454, 2021.

[13] C. O. Cervantes-Meza, M. H. Flores-Olvera, S. Arias y L. O. Alvarado-Cárdenas, «Reconsideraciones taxonómicas en especies mexicanas de *Gonolobus* (Apocynaceae-Asclepiadoideae),» *Botanical Sciences,* vol. 102, nº 2, pp. 635-645, 2024.

[14] J. F. Pío-León, A. Castro-Castro y L. O. Alvarado-Cárdenas, «*Gonolobus gonzaleziarum* (Apocynaceae), especie nueva de la ecorregión Madrense Tropical de la Sierra Madre Occidental, México,» *Acta Botánica Mexicana,* vol. 130, nº e2153, pp. 1-10, 2023.

[15] L. O. Alvarado-Cárdenas, J. F. Pío-León, G. Morillo y C. S. Islas-Hernández, «A new *Gonolobus* species (Apocynaceae, Asclepiadoideae) from Sinaloa, Mexico,» *Taxonomy,* vol. 4, pp. 1-9, 2024.

[16] L. O. Alvarado-Cárdenas, K. G. Maya-Mandujano y M. G. Chávez-Hernández, «*Gonolobus cthulhui* (Apocynaceae), a new species from Oaxaca, México,» *Acta Botánica Mexicana,* vol. 129, nº e2067, pp. 1-11, 2022.

[17] J. M. Ley-López, J. González y P. E. Hanson, «Plants and gall hosts of the Tirimbina Biological Reserve, Sarapiqui, Costa Rica: combining field sampling with herbarium records,» *Revista de Biología Tropical,* vol. 67, nº 2 Suplemento, pp. 212-227, 2019.

[18] A. Krings, A. Franck, R. Hammer, B. Jestrow, R. Renfro y J. Lange, «*Gonolobus taylorianus* (Apocynaceae: Asclepiadoideae: Gonolobineae) in Florida, U.S.A.,» *Journal of the Botanical Research Institute of Texas,* vol. 13, nº 1, pp. 315-317, 2019.

[19] M. M. Rivas, J. Zaldaña, A. Gálvez, U. G. Castillo, J. Menjívar, M. L. Martínez y M. J. Núñez, «Contenido de fenoles totales y actividad antioxidante en frutos de la flora salvadoreña,» *Revista Minerva,* vol. 3, nº 2, pp. 21-33, 2020.

[20] F. Rojas, F. González, M. F. Sánchez-Romero, S. Staikidis y G. L. Madrigal, «Ethnic study of traditional use of Cuayote (*Gonolobus taylorianus*) in Costa Rica,» *Journal of Medicinal Plants Studies,* vol. 8, nº 2, pp. 147-150, 2020.

[21] T. Khomphet, W. Intana, A. Promwee y S. S. Islam, «Genetic variability, correlation, and path analysis of Thai commercial melon varieties,» *International Journal of Agronomy,* vol. 2022, nº 7877239, pp. 1-6, 2022.

[22] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Melón (*Cucumis melo* L.) cultivado bajo invernadero: correlaciones entre variables,» *Tecnología en Marcha,* vol. 32, nº 1, pp. 134-150, 2019.

[23] P. Dahiya, K. Kour, P. Bakshi, S. Kour, D. B. Singh y B. Bhushan, «Correlation and path analysis using growth, flowering, fruiting and biochemical parameters in cape gooseberry,» *Indian Journal of Horticulture,* vol. 79, nº 2, pp. 145-150, 2022.

[24] M. B. Aguilar-Jiménez, L. Serrano-Cervantes, F. Lara-Ascencio y M. Pérez-Ascencio, «Caracterización morfoagronómica de seis cultivares de ayote (*Cucurbita moschata* Duch.) e incidencia de artrópodos y enfermedades,» *Revista Agrociencia,* vol. 1, nº 1, pp. 45-55, 2017.

[25] O. A. Umeh, I. S. Umeh, J. I. Ulasi, E. R. Keyagha y C. O. Cookey, «Principal component and correlation analyses study on fruit yield in cucumber (*Cucumis sativus* L.) genotypes,» *Electronic Journal of Plant Breeding,* vol. 15, nº 2, pp. 532-537, 2024.

[26] K. Chacón-Padilla y J. E. Monge-Pérez, «Producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo invernadero: correlaciones entre variables,» *Revista Posgrado y Sociedad,* vol. 18, nº 2, pp. 53-70, 2020.

[27] J. A. Cruz-Coronado, J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Pepino (*Cucumis sativus* L.) cultivado en ambiente protegido: correlaciones entre variables,» *Tecnología en Marcha,* vol. 34, nº 4, pp. 75-91, 2021.

[28] P. Verma, N. Chauhan y S. Bodh, «Correlation and path coefficient analyses for some yield-related traits in apple (*Malus domestica* Borkh) under mid-hill conditions of Himachal Pradesh, India,» *Electronic Journal of Plant Breeding,* vol. 15, nº 1, pp. 263-269, 2024.

[29] D. L. Chavan, D. P. Waskar, V. S. Khandare y S. P. Mehtre, «Correlation and coefficient analysis in chilli (*Capsicum annuum* L.),» *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences,* vol. 10, nº 2, pp. 1848-1851, 2021.

[30] J. Srinivas, K. R. Reddy, P. Saidaiah, K. Anitha, S. R. Pandravada y M. Balram, «Correlation and path analysis study in chilli (*Capsicum annuum* L.) genotypes,» *International Research Journal of Pure & Applied Chemistry,* vol. 21, nº 21, pp. 1-11, 2020.

[31] E. Elizondo-Cabalceta y J. E. Monge-Pérez, «Pimiento (*Capsicum annuum*) cultivado bajo invernadero: correlaciones entre variables,» *Revista Posgrado y Sociedad,* vol. 17, nº 2, pp. 33-60, 2019.

[32] D. Arya, A. K. Pal, A. K. Singh, B. Kumar y A. Rathour, «Studies of correlation and path coefficients for tomato yield and quality attributes (*Solanum lycopersicum* L.),» *International Journal of Environment and Climate Change,* vol. 13, nº 10, pp. 381-388, 2023.

[33] Y. Kousar, B. Tooheed, M. Z. Khan, H. Murad, M. Ramzan, I. Khadim, A. Fatima y S. Shakoor, «Correlation analysis for yield and yield contributing traits in tomato (*Solanum lycopersicon* L.),» *Life Science Journal,* vol. 18, nº 6, pp. 65-70, 2021.

[34] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado bajo invernadero: correlaciones entre variables,» *Tecnología en Marcha,* vol. 32, nº 3, pp. 37-54, 2019.

[35] S. Awasthi, D. P. Singh, P. Singh, A. Upadhyay y B. Lal, «Estimation of correlation and path coefficient for morphological and quantitative traits in okra (*Abelmoschus esculentus* L. Moench),» *Vegetable Science,* vol. 49, nº 2, pp. 176-182, 2022.

[36] I. Musa, U. Magaji, S. C. Chukwu, S. Swaray y A. S. Kiri, «Phenotypic and genotypic association of yield and yield-related traits in eggplant (*Solanum melongena* L.) evaluated for two seasons,» *Innovations in Agriculture,* vol. 6, pp. 1-7, 2023.

[37] J. E. Monge-Pérez, C. Arguedas-García y M. Loría-Coto, «Relaciones entre variables en berenjena (*Solanum melongena*),» *Tecnología en Marcha,* vol. 37, nº 1, pp. 40-50, 2024.

[38] G. Chetan, M. M. Pandya, N. A. Patel, R. J. Joshi y B. Desai, «Correlation and path analysis in brinjal (*Solanum melongena* L.) for yield and yield related traits,» *Electronic Journal of Plant Breeding,* vol. 14, nº 4, pp. 1549-1552, 2023.

[39] S. Jan, J. A. Baba, Z. A. Dar, G. Ali, S. A. Mir, S. Qurat y T. Angmo, «Studies on correlation and path coefficient analysis for various traits in different strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) cultivars under temperate climatic conditions of Kashmir,» *The Pharma Innovation Journal,* vol. 11, nº 7, pp. 3564-3567, 2022.

[40] R. D. Blanco-Fuentes, L. J. Castro-Torres, M. M. Espitia-Camacho, H. Araméndiz-Tatis y C. Cardona-Ayala, «Análisis de sendero entre características biométricas del fruto de *Caesalpinia ebano* H. Karst,» *Revista de Ciencias Agrícolas,* vol. 39, nº 2, pp. 186-197, 2022.

[41] M. M. Espitia-Camacho, H. Araméndiz-Tatis y C. E. Cardona-Ayala, «Correlaciones y análisis de sendero entre características del fruto y la semilla de *Benincasa hispida* [(Thunb.) Cogn.],» *Temas Agrarios,* vol. 26, nº 1, pp. 36-45, 2021.

[42] M. Liu, G. M. Plunkett, P. P. Lowry II, B. Van-Wyk y P. M. Tilney, «The taxonomic value of fruit wing types in the order Apiales,» *American Journal of Botany,* vol. 93, nº 9, pp. 1357-1368, 2006.

[43] J. A. Di Rienzo, F. Casanoves, M. G. Balzarini, L. González, M. Tablada y C. W. Robledo, «Infostat, versión 2008,» Grupo Infostat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 2008.

[44] M. A. Mondragón, «Uso de la correlación de Spearman en un estudio de intervención en fisioterapia,» *Movimiento Científico,* vol. 8, nº 1, pp. 98-104, 2014.

[45] J. Rubí, O. Varela, L. Granados, A. Vargas y K. Villalobos, «Efecto de la altitud sobre las características morfológicas y sensoriales vinculadas a la calidad del fruto de chayote (*Sechium edule*) tipo "quelite" producido en el Valle de Ujarrás, Costa Rica,» *Perspectivas Rurales,* vol. 17, nº 33, pp. 177-195, 2019.

[46] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Parámetros de selección para el rendimiento en melón (*Cucumis melo*) cultivado bajo invernadero,» *Cuadernos de Investigación UNED,* vol. 12, nº 2, pp. 1-11, 2020.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.